

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2012

Ladislav Novosád

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

Elektrické motorky malých a velmi malých
výkonů pro letecké modelářství, průzkum trhu

Electric motors of small and very small output
for aeromodelling, market research.

2012

Ladislav Novosád

Zadání bakalářské práce

Student: **Ladislav Novosád**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Elektrické motorky malých a velmi malých výkonů pro letecké modelářství, průzkum trhu
Electric motors of small and very small output for aeromodelling, market research.

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
 2. Modelářské elektromotorky podle kategorií
 3. Princip funkce stejnosměrných elektromotorků
 4. Funkce regulátoru stejnosměrného elektromotorku
 5. Princip funkce bezkartáčového elektromotorku
 6. Funkce regulátoru bezkartáčového elektromotorku
 7. Měření na elektromotorcích
 8. Přehled průzkumu trhu podle uvedených kritérií
- Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


Podklady firem např.:

- [1] Katalog MODEL MOTORS s.r.o., Okružní 1144, Hradec Králové 500 03
- [2] Katalog Hobbyteam, spol. s r.o. ,Praha-Karlín 506/62, 186 00 Praha-Karlín
- [3] Katalog RCM Pelikán, Doubravice 110, 533 53 Pardubice
- [4] Katalogy jiných výrobců elektromotorů malých a velmi malých výkonů
- [5] YEADON, WILLIAM H.: Handbook Of Small Electric Motors, McGraw-Hill London 2001


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Hrbáč, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011
Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě*3.5.2012*.....

Novosád
.....
Ladislav Novosád

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Pavlovi Hrabáčovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat také své rodině za podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Cílem této práce je popis fyzikální podstaty točivého stroje, popis druhů a konstrukce stejnosměrných elektromotorků a bezkartáčových elektromotorků. Jsou zde popsány hlavní způsoby řízení otáček a základní vlastnosti regulátorů. Dále je zde uveden popis měřicího pracoviště elektromotorků malých a velmi malých výkonů, na kterém bylo provedeno měření bezkartáčového elektromotorku. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách a v grafech. V závěru práce je uveden výsledek průzkumu trhu.

Klíčové slova:

Stejnosiměrný elektromotor, bezkartáčový elektromotor, EC motor, BLDC, regulátor otáček

Abstract

The aim of this work is description of the physical nature of rotating machine and construction description of kinds and constructions of DC electric motors and brushless electric motors. It describes the main characteristics of way of speed control and basic characteristics of regulators. Below, there is a description the measuring workplace of electric motors of small and very small output, which was used for the measurement of the brushless electric motor. The measured data are stated in the charts and graphs. In conclusion is that result of market research.

Key Words:

DC motor, brushless motor, EC motor, BLDC, speed controller

Seznam použitých symbolů a zkratek

B	magnetická indukce [T]
Br	remanentní magnetická indukce [T]
BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor (Brushless DC)
DC	stejnosměrný proud/napětí
EC	elektricky komutovaný (Electronically Commutated)
EMS	zpětná elektromotorická síla (back EMF)
F	síla působící na vodič [N]
Hc	koercitivní intenzita magnetického pole [A/m]
I	proud protékající vodičem [A]
Ia	proud protékající obvodem kotvy (rotoru) [A]
J	jižní magnetický pól
l	délka vodiče [m]
M	krouticí moment [Nm]
PM	permanentní magnet
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
S	severní magnetický pól
Ra	odpor kotvy (rotoru) [V]
r	vzdálenost působící síly F od osy otáčení [m]
Ua	napájecímu napětí kotvy (rotoru) [V]
Ui	indukované napětí kotvy (rotoru) [V]
α	úhel [°]
Φ	magnetický tok [Wb]
ω	úhlová rychlost [rad/s]

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Modelářské elektromotorky podle kategorií	2
2.1 Rozdělení elektromotorků podle typu konstrukce.....	2
2.1.1 Stejnosměrné elektromotorky	2
2.1.2 Střídavé elektromotorky	3
2.2 Rozdělení elektromotorků podle výkonu.....	3
2.3 Rozdělení elektromotorků podle napájecího napětí a otáček na 1 Volt	4
3. Princip funkce stejnosměrných elektromotorků	5
3.1 Princip a druhy stejnosměrných motorů s komutátorem	6
3.1.1 Závit s proudem v magnetickém poli	6
3.1.2 Druhy a vlastnosti stejnosměrných elektromotorů s komutátorem.....	8
3.1.2.1 Provozní vlastnosti, způsob řízení otáček a brzdění stejnosměrného elektromotoru buzeného permanentními magnety	9
3.2 Konstrukční uspořádání stejnosměrných elektromotorů	11
3.2.1 Konstrukce klasického stejnosměrného elektromotoru s permanentními magnety	11
3.2.1.1 Stator	11
3.2.1.2 Rotor.....	12
3.2.2 Konstrukce stejnosměrného elektromotoru s komutátorem, samonosným vinutím a rotorem bez železa	12
3.2.3 Komutátor a kartáče malých stejnosměrných elektromotorů	13
3.2.3.1 Komutace.....	14
3.2.4 Permanentní magnety.....	14
3.2.4.1 Ferity	15
3.2.4.2 Alnico	15
3.2.4.3 Slitiny vzácných zemin.....	15
4. Funkce regulátoru stejnosměrného elektromotorku.....	17
4.1 Lineární proudový regulátor	17
4.2 Pulzní proudový regulátor	18
5. Princip funkce bezkartáčového elektromotorku	20
5.1 Konstrukce bezkartáčového elektromotorku	21
5.1.1 Stator	21

5.1.2 Rotor	22
5.1.3. Způsoby konstrukčního uspořádání bezkartáčových motorků	23
5.1.3.1 Konstrukce s vnitřním rotorem	23
5.1.3.2 Konstrukce s vnějším rotorem	23
5.2 Princip funkce bezkartáčového motorku	24
5.2.1 Elektronická komutace motorku	24
5.2.2 Snímání polohy rotoru.....	25
5.3 Řízení rychlosti (otáček) bezkartáčového motoru	26
6. Funkce regulátoru bezkartáčového elektromotorku.....	27
7. Měření na elektromotorcích	28
7.1. Zařízení používána k měření vlastností malých elektromotorků	28
7.1.1 Dynamometr s hysterézní brzdou	29
7.2. Měření bezkartáčového elektromotorku	30
7.2.1 Popis měřicího pracoviště	30
7.2.2 Měření na bezkartáčovém elektromotorku AXI 4120/18 GOLD LINE.....	31
8. Přehled průzkumu trhu podle uvedených kritérií	35
8.1 Domácí výrobci modelářských elektromotorků a elektroniky	35
8.2 Zahraniční výrobci modelářských elektromotorků a elektroniky	37
Závěr	39
Seznam použité literatury	40
Seznam příloh	42

1. Úvod

V několika posledních letech se značně rozšířila nabídka elektropohonů pro modelářské potřeby a to do té míry, že z části vytlačila spalovací motory. To je patrné zejména v oblasti velmi malých a středních modelů, kde se projeví výhody těchto elektropohonů jako například nižší hlučnost oproti motorům spalovacím, motor neznečišťuje povrch modelu spaliny, jednodušší start motoru a také možnost motor vypnout a opět zapnout během letu. Díky těmto vlastnostem používá elektropohon stále více modelářů. V neposlední řadě je to také věc ekologie.

Tento druh pohonu má ovšem také nevýhody, jako například pořizovací cena takového pohonu. Elektropohon neznamena totiž pouze motor, ale také regulátor, baterii, a další nezanedbatelné součásti jako kvalitní nabíječ baterií a výkonný síťový zdroj pro něj a případně akumulátor pro nabíjení např. na letišti. Nedílnou součástí elektrického pohonu jsou také napájecí baterie (pohonné akumulátory). V současné době jsou k dispozici akumulátory s vysokou kapacitou a schopné dodávat vysoké proudy (desítky ampér) a s relativně nízkou hmotností a dlouhou životností. Jsou to zejména akumulátory typu NiCd, NiMh (dnes již se používají spíše jako zdroje elektrické energie pro napájení přijímačů a serv), LiOn, LiPol, LiFe (A123).

Velký význam pro rozšíření elektropohonů v modelářství (a to jak leteckém, lodním a automobilovém) přinesl vývoj výkonové polovodičové techniky používané hlavně v regulátorech pro řízení otáček motorů. To vše je dáno také rostoucí konkurencí, a klesající ceny materiálů a tím i konečné ceny výrobku, který se tím stává dostupnějším.

Modelářské elektropohony jsou tvořeny především dvěma druhy motorů a to buď klasickými komutátorovými elektromotory (stejnoseměrné), nebo elektromotory, které jsou označovány výrobcem a modeláři jako střídavé motory, ale jedná se v podstatě o elektricky komutované stejnosměrné elektromotory (označované jako EC, nebo BLDC – Brushless DC motor). Tyto elektromotory se vyrábějí v různých velikostech a dosahují výkonů od několika wattů až do několika kilowattů. Vzhledem ke svým výkonům dosahují tyto motory nízkých hmotností, malých rozměrů velikosti a velmi dobrých výkonů.

2. Modelářské elektromotorky podle kategorií

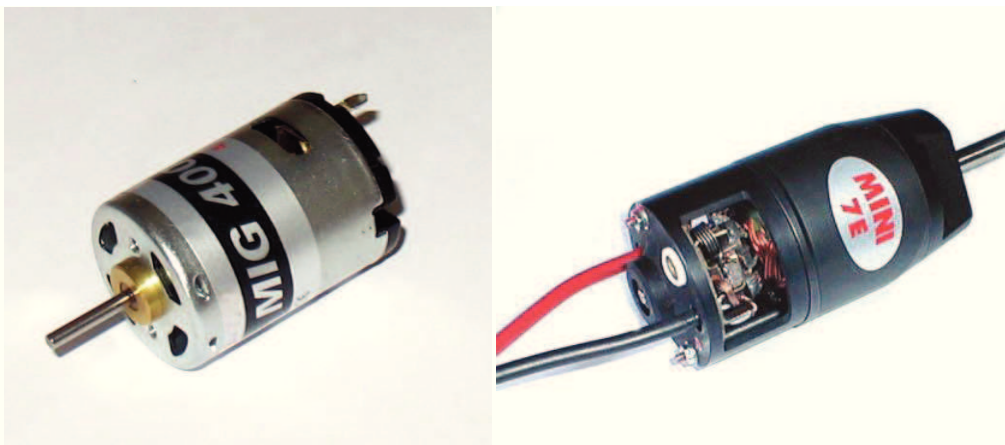
V této kapitole bude provedeno rozdělením modelářských motorů do různých kategorií. Těchto kategorií existuje ovšem nepřeberné množství, jelikož každý druh leteckého modelářství klade jiné požadavky na parametry motoru a tedy i celého systému pohonu modelu. Obecně ale můžeme rozdělit tyto elektropohony podle konstrukce motoru a to na stejnosměrné motory s komutátorem a motory které jsou modeláři nazývané střídavými, ale jedná se o motory stejnosměrné elektricky komutované. Tyto motory se odborně nazývají jako EC motory (elektronicky komutované motory) nebo BLDC motory (Brushless DC motor). Dále můžeme motorky rozdělit podle napájecího napětí, podle výkonu, podle otáček na jeden volt (bez zatížení), ale také podle toho v jakém druhu modelu bude tento motor pracovat. Je zřejmé, že například pro pohon akrobatického modelu, kde bude elektromotor pohánět přímo vrtuli, budou požadavky úplně jiné, než například u modelu stíhačky, kde bude elektromotor pohánět dmychadlo.

2.1 Rozdělení elektromotorků podle typu konstrukce

Pro lepší přehlednost zde budu označovat elektromotorky stejně, jak to dělají výrobci a prodejci těchto motorů - stejnosměrné komutátorové elektromotorky budeme označovat jako stejnosměrné, a elektricky komutované elektromotorky jako střídavé.

2.1.1 Stejnosměrné elektromotorky

Jedná se o klasické stejnosměrné elektromotory popisované podrobně v kapitole č.3.. Tyto motorky byly prvními elektromotory používanými pro pohon leteckých modelů s elektropohonem. S rozvojem polovodičové techniky jsou ovšem vytlačovány střídavými motory. Na obrázku č.2.1 jsou zobrazeny příklady provedení těchto motorků.



Obr. č. 2.1 Ukázky provedení stejnosměrných motorů. Na obrázku vlevo „levnější“ varianta a na pravé straně je špičkového provedení motoru. Oba motory vyrábí firma Megamotor.

2.1.2 Střídavé elektromotorky

Střídavý elektromotor (EC, BLDC, stejnosměrné bezkartáčové elektromotorky) nemá uhlíky, kartáče a ani komutátor a proto je jejich spolehlivost vyšší a náročnost na údržbu menší než u stejnosměrných motorů. Naopak účinnost těchto motorů je ovšem větší. Tyto motory můžeme dále rozdělit podle typu konstrukce a to na motory s vnějším rotorem (Outrunnery) viz Obr. č. 2.2 a vnitřním rotorem (Inrunnery) viz Obr. č. 2.2. Elektrické vlastnosti obou konstrukčních provedení jsou si zcela rovnocenné, i když jsme někdy výrobci a prodejci přesvědčováni, že tomu tak není. Rozhodující vlastnosti těchto motorů jsou dány z velké míry průměrem a šířkou mezery mezi pólovými nástavci. Motory s vnitřním uložením rotoru jsou díky konstrukci méně náchylné k poškození při havárii modelu. Princip funkce těchto motorů bude podrobně rozebírán v dalších kapitolách.



Obr. č. 2.2 Příklad konstrukce motoru s vnějším rotorem určeného pro menší modely od výrobce Model motors (AXI 2204/54 GOLD LINE) a motoru s vnitřním rotorem určeného pro větší modely od výrobce Megamotor (MEGA - ACn 16/15/4 COMBAT)

2.2 Rozdělení elektromotorků podle výkonu

Toto rozdělení se bude odvíjet v první řadě od výkonu těchto motorků (resp. příkonu za předpokladu účinnosti). Vhodná velikost elektromotoru závisí především na hmotnosti modelu. V následujícím rozdělení se bude jednat o hrubé odhady, jelikož potřebný výkon elektromotoru je ovlivněn celkovými vlastnostmi pohonu (vrtule, baterie, atd.) a konstrukcí modelu.

Motory jsou rozděleny podle kategorie modelů, ve kterých budou použity, a výkon motoru bude posuzován v poměru s hmotností modelu připraveného k letu.

100-140 W na kg... motory s malým výkonem vhodné pro modely typu slow a park flyer

140-180 W na kg... motory pro modely s malým přebytkem výkonu: trenéry, pomalé makety

180-220 W na kg... motory pro modely schopné základní akrobacie, rychlé makety

220-260 W na kg... motory pro akrobatické a rychlé modely

260-300 W na kg... modely pro 3D akrobacii, modely s pohonem dmychadlem

300-400 a více W na kg... motory pro modely určené k neomezené akrobacii

2.3 Rozdělení elektromotorků podle napájecího napětí a otáček na 1 Volt

Rozsah napájecího napětí v modelech je dán dostupnými zdroji (bateriemi). Tím je zároveň dáno i pracovní napětí těchto motorků. Nejčastější rozsahy napájecí napětí modelářských elektromotorů jsou:

$\pm 7,2 - 14,4 \text{ V}$... elektromotory napájeny z baterie tvořené 6-12 články NiCd, NiMh

$\pm 7,4 \text{ V}$... elektromotory napájeny z baterie složené ze dvou článků LiPol, LiOn, LiFe

$\pm 11 \text{ V}$... elektromotory napájeny z baterie složené ze tří článků LiPol, LiOn, LiFe

Pro tyto rozsahy je většinou konstruována i veškerá elektronika používána v modelech. V některých specifických případech mohou být hladiny napětí i vyšší, to se ovšem používá zejména u větších a výkonnějších modelů.

Pro modelářské elektromotory je také důležitá hodnota otáček motoru v závislosti na jednom voltu. Například pro lehké a pomalé halové modely zvolíme motor s vyššími otáčkami na volt (rychlejší motor) a napětí napájecí baterie zvolíme nižší (2 články LiPol). A naopak pro pohon extrémně rychlého modelu použijeme motor s nízkými otáčkami na volt a napájecí baterii s vyšším napětím (např. baterii složenou z deseti článků NiCd).



Obr. č. 2.4 Příklad napájecí baterie. Jedná se o baterii složenou ze tří článků LiPol, výrobce Foxy

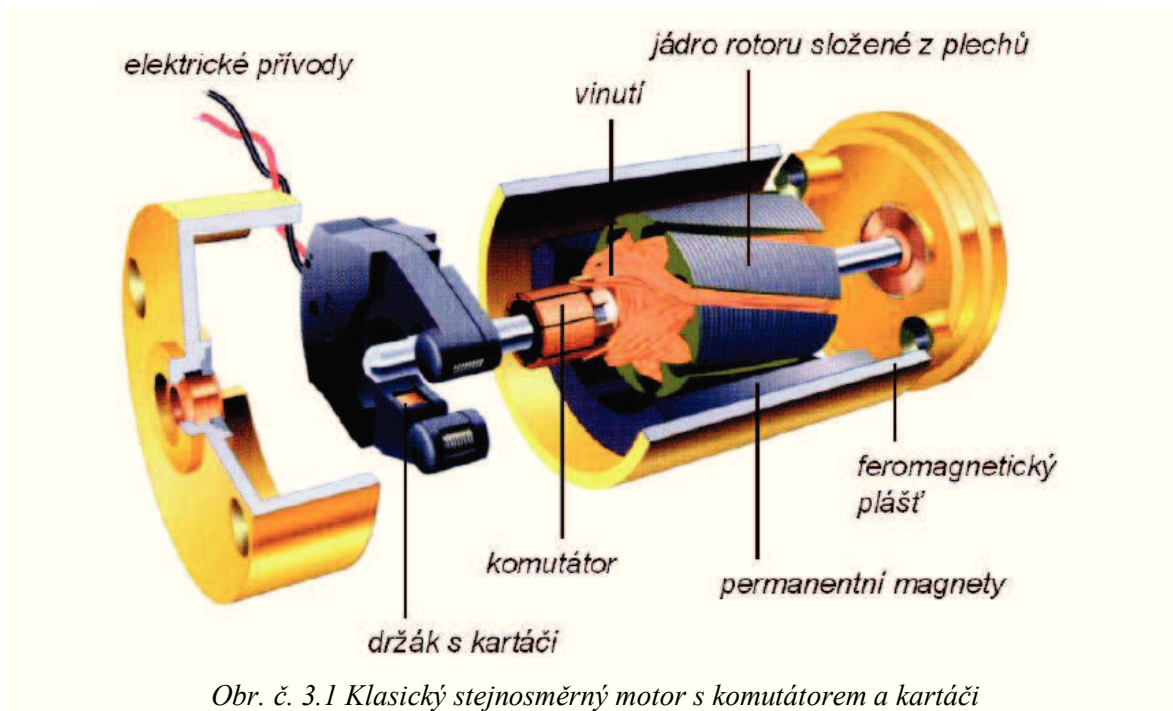
3. Princip funkce stejnosměrných elektromotorků

Stejnosměrné stroje patří mezi historicky nejstarší stroje. Tyto stroje nejprve sloužily k výrobě elektrické energie (dynama) a později také k přeměně elektrické energie na energii mechanickou (motory).

Jeden z prvních rotačních elektromotorů, možná i vůbec první, vynalezl Michael Faraday v roce 1821. Jeho motor se skládal z volně zavěšeného vodiče ponořeného do nádrže se rtutí. Ve středu nádrže byl umístěn permanentní magnet. Zavěšeným vodičem procházel elektrický proud a vodič rotující kolem permanentního magnetu prokazoval, že proud vytvořil kolem vodiče točivé magnetické pole.

Stejnosměrný motor se nijak konstrukčně neliší od dynama, a proto platí, že každý stejnosměrný motor může pracovat jako dynamo a naopak. Princip činnosti stejnosměrného komutátorového motorku je založen na elektromagnetickém působení dvou polí, z nichž jedno je vázáno na stator a druhé na rotor. Malé (klasické) stejnosměrné motory mají stator tvořen ocelovým pláštěm, na kterém jsou z vnitřní strany umístěny permanentní magnety. Jádro rotoru (kotvy) je složené z plechů. Vinutí rotoru je tvořené cívkami, které jsou vkládány do drážek rotoru. Začátky a konce tohoto vinutí jsou vyvedeny na lamely mechanického komutátoru, který zajišťuje přívádění správně orientovaného proudu do jednotlivých cívek vinutí. Proud se na komutátor přivádí prostřednictvím kartáčů. Názorný příklad konstrukčního uspořádání takového motoru je na Obr. č. 3.1.

V následujících kapitolách se budeme dále zabývat principem činnosti těchto motorů, popisem vlastností jednotlivých typů a jejich konstrukčním uspořádáním.



3.1 Princip a druhy stejnosměrných motorů s komutátorem

Následující kapitoly jsou zavedeny pro pochopení fyzikální podstaty stejnosměrného stroje s komutátorem. Dále se zde budeme zabývat druhy stejnosměrných motorů podle zapojení vinutí kotvy s budícím vinutím statoru, jejich vlastnostmi a způsobu řízení otáček.

3.1.1 Závit s proudem v magnetickém poli

Protéká-li vodičem, který je umístěn v magnetickém poli elektrický proud, bude na tento vodič působit síla $d\vec{F}$. Ampér dokázal, že velikost síly $d\vec{F}$ jenž působí na element vodiče $d\vec{l}$ v magnetickém poli je úměrná proudu I protékajícímu tímto elementem vodiče a indukci pole \vec{B} . Síla $d\vec{F}$, která působí na vodič také závisí i na směru působení magnetického pole. Síla je maximální, pokud je směr magnetického pole působícího na směr elementu proudu kolmý a naopak, pokud je směr magnetického pole shodný se směrem elementu proudu, je síla nulová. To lze zapsat pomocí rovnic (3.1, 3.2).

$$dF = I \cdot B \cdot dl \cdot \sin \alpha \quad (3.1)$$

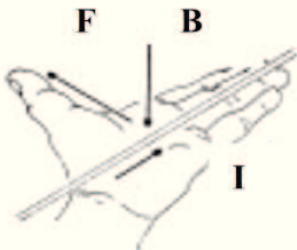
Rovnici můžeme také zapsat ve vektorovém tvaru jako:

$$d\vec{F} = I \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (3.2)$$

Tento vztah (3.2) se nazývá Ampérovým zákonem elektromagnetické indukce a vyjadřuje sílu magnetického pole o indukci \vec{B} na element proudu $I d\vec{l}$. Ze vztahu vylívá, že tato síla je vždy kolmá jak k proudovému elementu, tak i ke směru magnetického pole. Integrací rovnice (3.2) podél celého úseku vodiče dostaneme vztah (3.3).

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (3.3)$$

Tento vztah vyjadřuje velikost síly F působící na přímý vodič délky l , jímž protéká proud I a který je umístěn v homogenním magnetickém poli s indukcí B kolmo ke směru indukčních čar. Směr síly F potom můžeme určit Flemingovým pravidlem levé ruky. Položíme-li se levá ruka tak, že prsty ukazují směr proudu ve vodiči a indukční čáry vstupují do dlaně, potom palec ukazuje směr působení síly F na vodič. [1],[2]



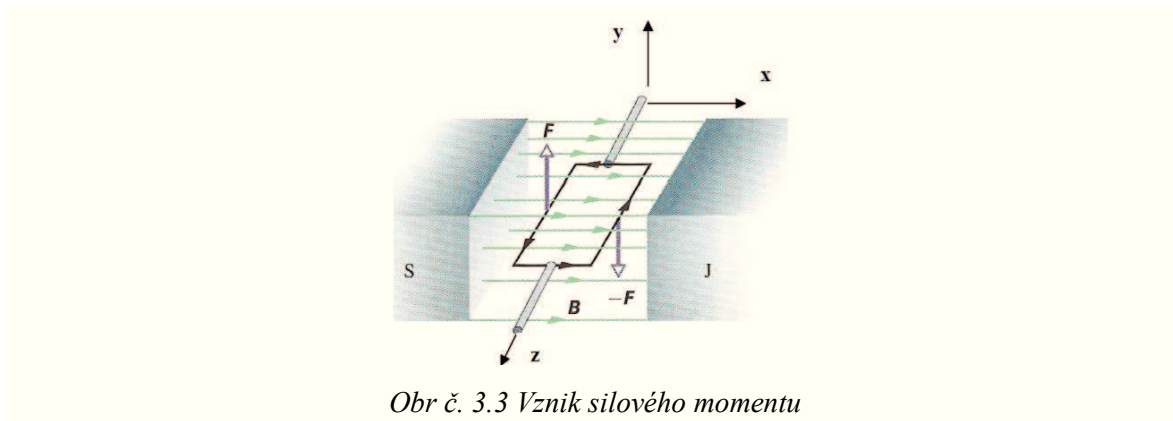
Obr. č.3.2 Aplikace Flemingova pravidla

3. PRINCIP FUNKCE STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTROMOTORKŮ

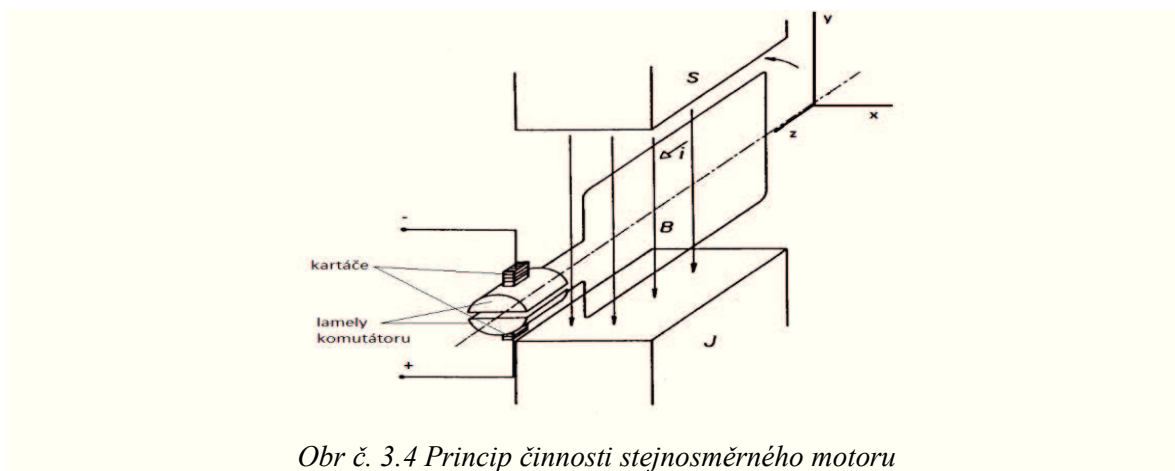
Jestliže do magnetického pole vložíme smyčku protékanou proudem viz Obr č.3.3, budou na ni působit dvě magnetické síly \vec{F} a $-\vec{F}$. Tyto síly vytvoří silový moment, který způsobí otáčení proudové smyčky kolem osy z. Velikost silového momentu můžeme potom definovat pomocí vztahu:

$$\vec{M} = 2 \cdot (\vec{F} \cdot \vec{r}) \quad (3.4)$$

kde vektor \vec{r} značí vzdálenost působící síly od osy otáčení.



Zjednodušený stejnosměrný motor viz Obr č. 3.4 má vinutí rotoru (kotvy) tvořené pouze dvěma vodiči, které jsou spojené do jednoho závitu. Závít je umístěn v magnetickém poli statoru vytvořeném pomocí dvojice hlavních pólů. Tyto póly jsou tvořeny permanentními magnety umístěnými naproti sobě. Takto vytvořená smyčka se bude volně otáčet kolem osy z díky působení dvojice sil. V určitém okamžiku by však nastala situace, kdy by se cívka zastavila, protože by se nacházet v rovnovážné poloze. Rozběh bude opět možný až po reverzaci proudu. Tu u stejnosměrných motorů zajišťuje komutátor. Závít je proto připojen ke dvěma lamelám komutátoru, které jsou navzájem odizolovány a otáčejí se společně s rotorem. Na komutátor dosedají dva nepohyblivé kartáče, které jsou umístěné v tzv. neutrální ose mezi dvěma póly. Přes kartáče se potom na komutátor a zároveň také na zívít přivádí napětí. Komutátor zde plní funkci rotačního přepínače a mění směr elektrického proudu a tím i polaritu magnetického pole procházejícího závitem na rotoru (kotvě) dvakrát během každé otáčky. Tím zajistí, že síla působící na póly rotoru má stále stejný směr. V okamžiku přepnutí polaritu udržuje otáčení motoru ve správném směru setrvačnost.[1],[2],[3]

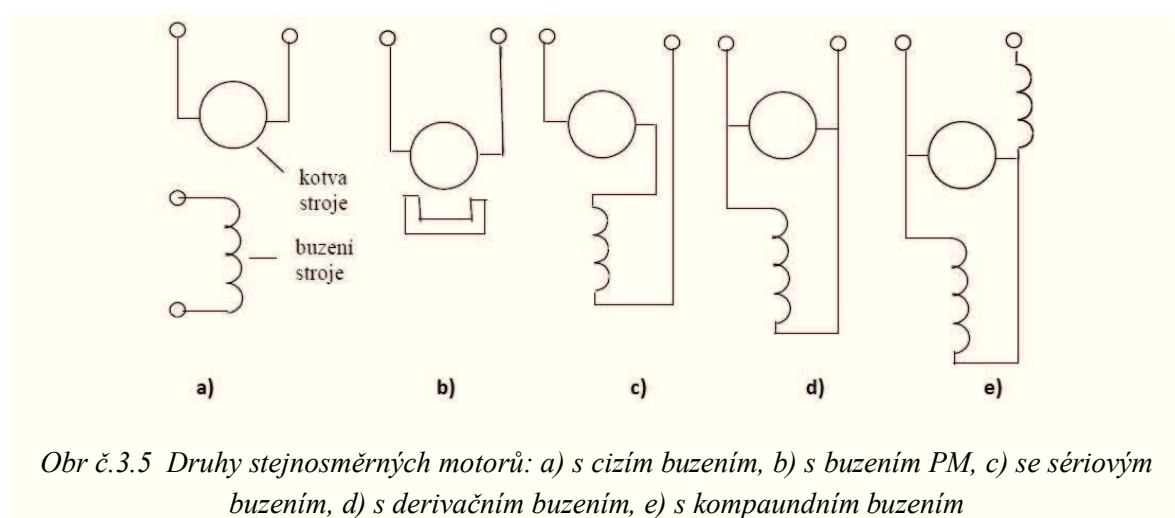


3.1.2 Druhy a vlastnosti stejnosměrných elektromotorů s komutátorem

Stejnosemné stroje rozdělujeme, bez ohledu na to, jestli pracují jako motory nebo generátory (dynama), podle způsobu napájení budícího vinutí hlavních pólů umístěných na statoru a vinutí kotvy. Podle druhu buzení má každý motor své charakteristické vlastnosti, které můžeme posoudit podle příslušných charakteristik stroje. U motorů jsou to zejména jejich mechanické charakteristiky, tj. závislost úhlové rychlosti na momentu motoru při různých tzv. regulačních parametrech.

Podle druhu buzení tedy rozeznáváme motory s:

- cizím buzením (místo pólů s budícím vinutím mohou být na statoru upevněny PM)
- sériovým buzením
- derivačním buzením
- kompaundním buzením



V dalších kapitolách této práce se budeme zabývat pouze stejnosměrnými motory s cizím buzením, resp. s buzením permanentními magnety. Motory se sériovým buzením, derivačním buzením a koumpaudním buzením tedy nebudou v této práci dále rozebírány, protože motory malých a středních výkonů pro letecké modelářství se vyrábějí výhradně pouze s buzením permanentními magnety (motory s cizím buzením). Více informací o motorech se sériovým buzením, derivačním buzením a koumpaudním buzením lze nalézt v literatuře: [1], [3], [4], [5] a [13].

3.1.2.1 Provozní vlastnosti, způsob řízení otáček a brzdění stejnosměrného elektromotoru buzeného permanentními magnety

Stejnosměrné motory s permanentním magnetem (s cizím buzením) byly v minulosti velmi rozšířeny jako pohony regulační a to hlavně kvůli výhodám těchto motorů. V dnešní době už jsou ovšem motory s komutátorem vytlačovány střídavými motory.

Mezi hlavní výhody těchto motorů patří:

- jednoduché řízení rychlosti (otáček)
- velký točivý moment zejména při nízkých otáčkách
- snadná změna směru otáčení rotoru
- velký rozsah rychlosti, která není závislá na frekvenci sítě
- velký rozsah výkonů

Stejnosměrný motor s permanentními magnety má konstantní magnetický tok Φ , jehož velikost je dána použitým typem magnetů a konstrukcí magnetického obvodu. Pro obvod kotvy (rotoru) je možno v ustáleném stavu napsat rovnici:

$$U_a = R_a \cdot I_a + U_i = R_a \cdot I_a + C\Phi\omega \quad (3.5)$$

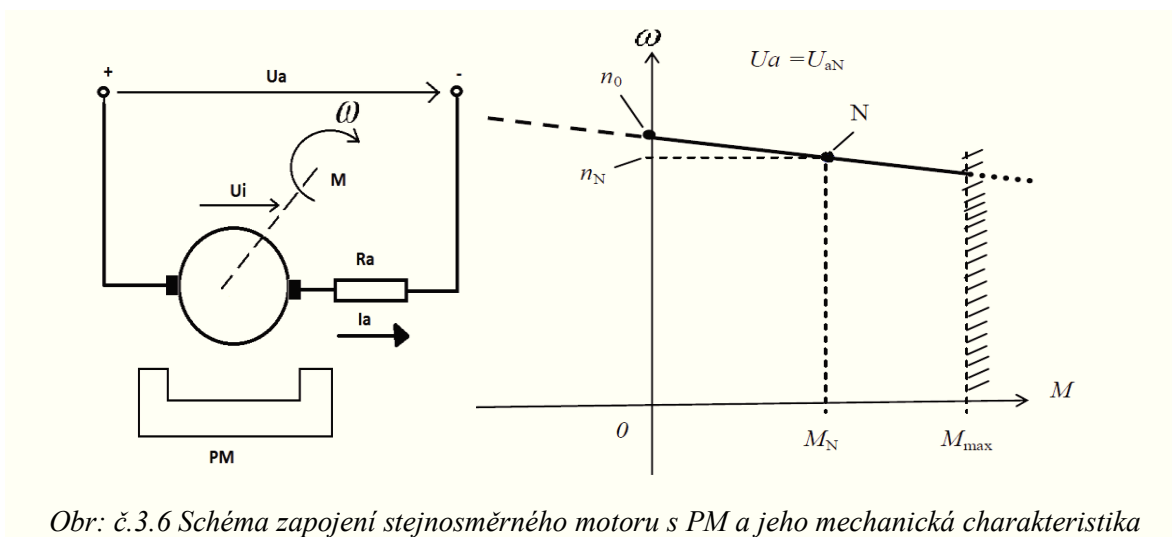
pro úhlovou rychlost (otáčky) motoru:

$$\omega = \frac{U_a}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} \cdot M = \omega_0 - k \cdot M \quad (3.6)$$

kde: ω_0 = ideální otáčky naprázdno, k = směrnice charakteristiky určující pokles otáček při zatížení

a pro moment motoru:

$$M = C\Phi I_a \quad (3.7)$$



Obr: č.3.6 Schéma zapojení stejnosměrného motoru s PM a jeho mechanická charakteristika

Otáčky motoru naprázdno n_0 jsou tedy přímo úměrné napájecímu napětí kotvy U_a a nepřímo úměrné magnetickému toku Φ . Sklon (tvrdost) charakteristiky vyjádřený koeficientem k , je přímo úměrný velikosti celkového odporu kotevního obvodu R_a a nepřímo úměrný magnetickému toku Φ .

U stejnosměrných motorů buzených permanentními magnety lze otáčky řídit změnou napětí kotvy, tj. změnou napájecího napětí nebo změnou odporu kotvy v obvodu. Změna odporu kotvy se provádí zařazováním přídavného odporu do obvodu kotvy, což je ovšem energeticky nevhodné (jde o ztrátovou regulaci) a rozsah možnosti regulace klesá s klesajícím zatěžovacím momentem. Tento způsob regulace se téměř nepoužívá, výjimku mohou tvořit aplikace s velmi malým výkonem, nebo použití při rozběhu motoru. V praxi se tedy používá řízení rychlosti motoru změnou velikosti napájecího napětí motoru. To se nejčastěji provádí pomocí polovodičové techniky – tranzistorové nebo tyristorové regulátory. Použitím polovodičových regulátorů lze dosáhnout téměř bezztrátové regulace a hlavně lze regulaci zcela automatizovat. Princip regulace polovodičovými regulátory je popsán v kapitole č.4. [1, 3, 4, 5 a 13].

Princip brzdění stejnosměrného motoru s permanentními magnety je založen na změně směru mechanického výkonu na hřídeli motoru. Má-li dojít k brzdění, musí se změnit smysl momentu M motoru, který tak působí proti smyslu otáčení rotoru. Z toho vyplývají možnosti brzdění motoru:

- brzdění do brzdného rezistoru
- brzdění protiproudem
- brzdění rekuperační (generátorické – používá se u regulátorů pro modely letadel)

3.2 Konstrukční uspořádání stejnosměrných elektromotorů

V této kapitole se budeme dále zabývat konstrukčním uspořádáním stejnosměrných komutátorových motorů. Tyto motorky se skládají ze statoru, rotoru a sběracího ústrojí. Podle provedení rozlišujeme tyto komutátorové motory na motory s klasickou (konvenční) konstrukcí a motory se samonosným vinutím a rotorem bez železa.

3.2.1 Konstrukce klasického stejnosměrného elektromotoru s permanentními magnety

Příkladem takového konstrukčního uspořádání je motor na Obr. č.3.1.

3.2.1.1 Stator

Stator stejnosměrného elektromotoru je nejčastěji vytvořen z feromagnetického materiálu. To ovšem není podmínkou a některé speciální motory mohou mít stator i z jiných materiálů. U větších motorů jsou na statoru z vnitřní strany upevněny budící póly s pólovými nástavci. Na budících pólech jsou navinuty cívky budícího vinutí. Také mohou být na statoru mezi hlavními budícími póly umístěny komutační póly a uvnitř pólových nástavců kompenzační vinutí. Komutační póly však nejsou pro funkci motoru podmíněčně nutné. Jejich úloha spočívá ve vytváření dobrých komutačních podmínek -zmenšují jiskření vznikající mezi kartáči a komutátorem.

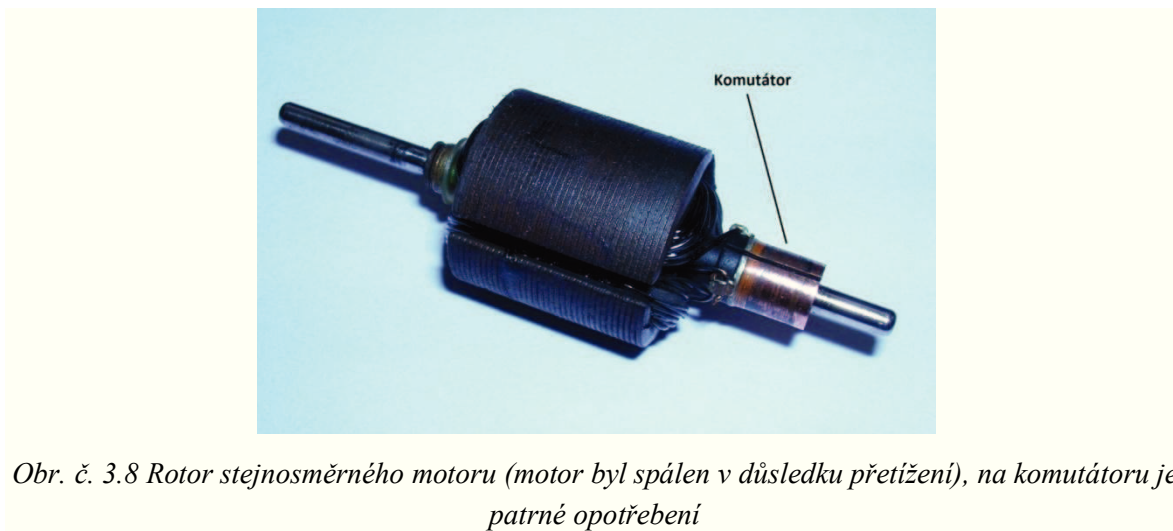
U malých elektromotorů se místo budících cívek umístěných na budících pólech používá permanentních magnetů. Permanentní magnety vytvářejí stálé magnetické pole statoru. Nejčastějšími materiály pro výrobu permanentních magnetů jsou magneticky tvrdé ferity, slitina Alnico a materiály ze vzácných zemin obsahující neodym, bor a železo. Použitím permanentních magnetů zároveň odpadá nutnost napájení budícího vinutí. U motorů s permanentními magnety ovšem nelze řídit otáčky motoru změnou velikosti intenzity magnetického pole.



Obr. č. 3.7 Stator stejnosměrného motoru s permanentními magnety

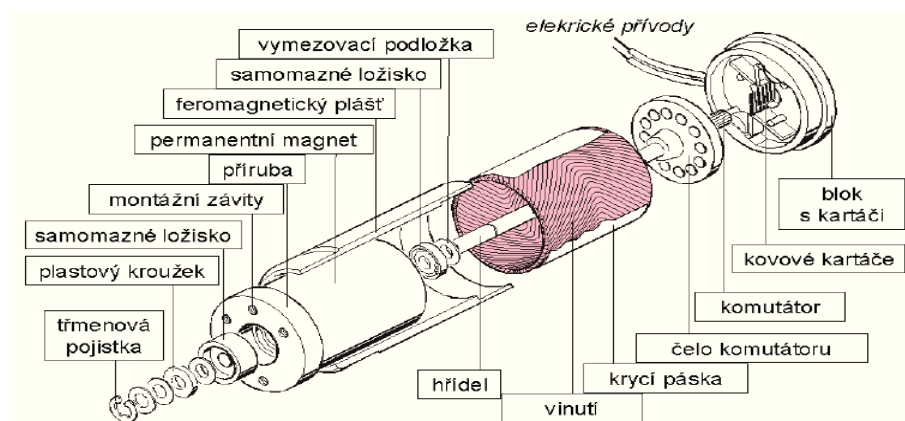
3.2.1.2 Rotor

Rotor (kotva) je složen z elektrotechnických plechů. Aby se omezily ztráty vířivými proudy, jsou tyto plechy od sebe vzájemně izolovány a mají velký měrný odpor. Vzájemné odizolování plechů je provedeno lakováním, oxidováním, nátěrem organickými látkami případně papírem. Na rotoru jsou z vnější strany drážky, ve kterých jsou umístěny cívky rotorového vinutí. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na měděné lamely komutátoru. Lamely komutátoru jsou od sebe navzájem odizolovány a tvoří válec, který je uchycen na hřídeli rotoru.



3.2.2 Konstrukce stejnosměrného elektromotoru s komutátorem, samonosným vinutím a rotorem bez železa

Jedná se o speciální malé stejnosměrné motory s permanentními magnety, kartáči, komutátorem a samonosným měděným vinutím rotoru. Permanentní magnet je umístěn uvnitř vinutí rotoru a neotáčí se. Kolem magnetu se otáčí samonosné vinutí rotoru a celý motor je obklopen pláštěm z feromagnetického materiálu. Konstrukce takového motoru je na Obr.č.3.9. Motor se samonosným vinutím je rozměrově menší a lehčí než motor klasické konstrukce, neboť permanentní magnet je vložen do prostoru uvnitř dutého vinutí a pro vnější část magnetického obvodu stačí tenký plášť motoru umístěný těsně nad vinutím. Samonosné vinutí dává těmto motorům i další vlastnosti, díky kterým tyto motory vynikají nad klasickými motory. Mezi tyto vlastnosti patří i rychlejší reakce motoru na změnu napájecího napětí. Také moment setrvačnosti motoru je nižší o moment setrvačnosti jádra rotoru, takže i mechanická časová konstanta motoru je pouze několik ms až několik desítek ms, během kterých se pohon rozběhne na požadovanou rychlost. Motor má také mnohem delší životnost. To je dáno tím, že energie zanikajícího magnetického pole u tohoto motoru je mnohem menší, jelikož neobsahuje energii v železném jádru rotoru. Jiskření na komutátoru a tím i opalování kartáčů je proto mnohem menší než u klasického stejnosměrného motoru. [7]



Obr. č. 3.9 Provedení stejnosměrného komutátorového motorku se samonosným vinutím od firmy MAXON

3.2.3 Komutátor a kartáče malých stejnosměrných elektromotorů

Komutátor je nepostradatelnou součástí stejnosměrných elektromotorů. Používá se také u univerzálních motorů fungujících na stejnosměrný i střídavý proud. U stejnosměrných elektromotorů plní funkci mechanického střídače, což znamená, že mění směr proudu v cínce rotoru (kotvy). Zajišťuje tím optimální úhel natočení magnetických polí rotoru a statoru o 90° ve všech rychlostech a při jakémkoli zatížení.

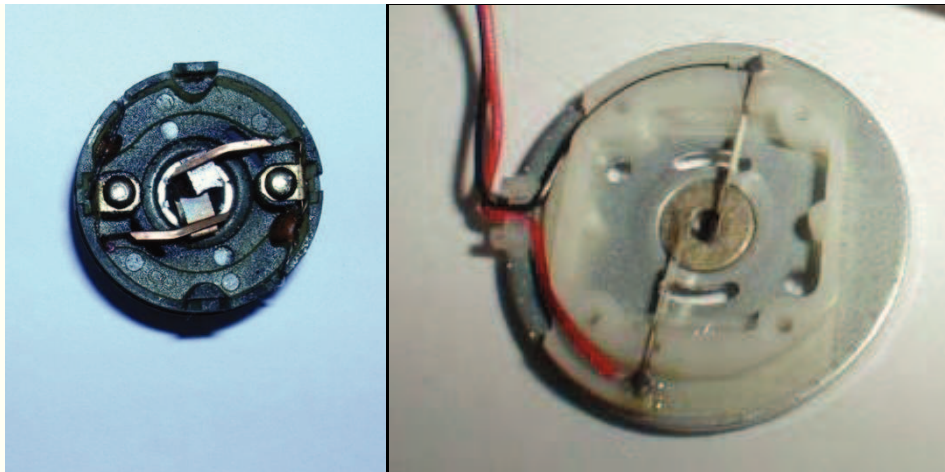
Komutátor se skládá z lamel, které jsou vytvořené z tvrdé mědi, uspořádané do tvaru válce a staženy stahovací konstrukcí. Jednotlivé lamely jsou od se vzájemně odizolovány. K izolaci lamel se nejčastěji používá slída. Komutátor také ovlivňuje kvalitu motoru, protože čím více má rotor cívek vinutí, tím pádem i komutátor lamel, tím více je průběh točivého momentu rovnoměrnější a tedy i celkový chod motoru. Počet lamel je tedy jeden z důležitých ukazatelů kvality motoru.

Na povrch komutátoru dosedají kartáče. Kartáče mohou být provedeny jako kovové nebo grafitové. Kovové kartáče se používají u menších motorů s malými proudy a naopak grafitové kartáče se používají u větších motorů, kde tečou přes komutátor a kartáče větší proudy.

Kovové kartáče jsou tvořeny pouze tenkým páskem ze slitiny drahých kovů stříbra, paládia a mědi. Tento tenký pásek je nastříhán na šířku komutátoru. Kovové kartáče potom doléhají na povrch komutátoru pouze vlastní pružností a vytvářejí malou přitlačnou sílu, která ovšem stačí pro dokonalý elektrický kontakt. Malá přitlačná síla vytváří také malé mechanické brzdění rotoru. Motory s kovovými kartáči se vyznačují lehkým rozběhem i po dlouhé době stání a také menším proudem při běhu motoru naprázdno.

Grafitové kartáče doléhají na válcový povrch podstatně větší silou a větší plochou než kovové kartáče a proto také přenesou vyšší proudy. Jelikož je ale potřebná větší přitlačná síla kartáčů k povrchu komutátor, dochází tím k většímu opotřebení (obrušování) kartáčů i komutátoru. Obrušováním kartáčů vzniká grafitový prach, který působí jako mazivo komutátoru, ale také znečišťuje vnitřek motoru. Další nevýhodou grafitových kartáčů je, že přechodový elektrický odpor

kontaktu kartáčů je během otáčení motoru nestejnomořný a při malých proudech roste. Následkem toho vykazuje průběh proudu během otáčení motoru ostré nepravidelné proudové špičky. Amplituda tohoto zvlnění se snižuje s rostoucím počtem lamel komutátoru.



Obr. č. 3.10 Zadní víka stejnosměrných motorů s uhlíkovými a kovovými kartáči

Velkou nevýhodou motoru s komutátorem je to, že do rotoru se přivádí elektrická energie prostřednictvím stojících kartáčů a rotujících lamel komutátoru. V bodech styku kartáčů s lamelami komutátoru (a to hlavně na jejich hranách) vzniká jiskření, ke kterému dochází následkem odpojování segmentů vinutí při přechodu kartáčů na následující lamelu komutátoru. Proud v odpojované části vinutí vytvářel magnetické pole rotoru, které při odpojení této části zaniká a jeho energie se mění na proud, který se uzavírá přes odcházející lamelu a kartáč jako elektrický oblouk. Toto jiskření svým působením ničí povrch obou stykových ploch, zvyšuje jejich opotřebení a také způsobuje elektromagnetické rušení. Kvůli tomu mají stejnosměrné motory omezenou životnost a jsou také náročnější na údržbu. [4,7]

3.2.3.1 Komutace

Komutace je děj ve stejnosměrném motoru (stroji) při které dochází ke změně smyslu proudu ve vinutí rotoru (kotvy) při přechodu kartáče z lamely na lamelu. Aby proud změnil svůj směr, musí nejdříve zaniknout, tím ale také zanikne magnetické pole vyvolané tímto proudem. Nastává tedy časová změna magnetického toku, při níž se vlastní indukci indukuje ve vodiči napětí nazývané reaktanční. Toto napětí spolu s lamelovým napětím vytváří jiskření na komutátoru. Proto se snažíme průběh komutace ovlivnit tak, aby k jiskření nedocházelo. Potlačujeme tedy lamelové napětí kompenzačními a pomocnými póly (to platí pro velké motory) a navíc lamely se stejným napětím propojujeme lamelovými spojkami a reakční napětí vyrušíme tím, že ke komutaci bude docházet přesně v magnetické neutrále.[8]

3.2.4 Permanentní magnety

Nezbytnou součástí statoru malých stejnosměrných motorů jsou permanentní magnety (PM). Permanentní magnety vytvářejí kolem sebe magnetické pole bez potřeby budícího vinutí a vnějšího zdroje elektrického výkonu. Vnější energie je potřebná pouze při změně velikosti magnetického

pole permanentních magnetů. Pro výrobu permanentních magnetů se používá chemických sloučenin kovů s výraznými magnetickými vlastnostmi. Tyto sloučeniny jsou magneticky tvrdé feromagnetické materiály a vyznačují se širokou hysterezní smyčkou. V minulosti se pro výrobu permanentních magnetů používaly legované oceli, kde přidávané legury byly nejčastěji Cobalt-Co a Chrom-Cr. Tyto magnety se vyznačují malou hodnotou remenance B_r , malou koercivitou H_C a zejména dobrými mechanickými vlastnostmi. Velkou mechanickou výhodou těchto magnetů je, že nejsou křehké a je možné je třískově obrábět.

V současné době, se k výrobě permanentních magnetů používají tři typy materiálů:

- Ferity
- AlNiCo
- Slitiny vzácných zemin

3.2.4.1 Ferity

Feritové (keramické) permanentní magnety patří mezi nejrozšířenější skupinou magnetů. Vyrábí se cestou práškové metalurgie, to znamená spékáním práškové směsi kysličníků kovů (Baryum-Ba, Stroncium-Sr) spolu s železem. Základní suroviny jsou rozemlety na jemný prášek, smíchány dohromady, poté slisovány do požadovaného tvaru a spékány v peci při teplotě kolem 1300°C. Vyrábějí se dva druhy těchto magnetů a to anizotropní a izotropní. Izotropní magnety jsou vyráběny suchou cestou, tj. lisováním a následně zmagnetovány působením magnetického pole. Anizotropní magnety jsou vyráběny mokrou cestou, tj. vstřikováním do formy při současném působení magnetického pole.

Výsledným produktem je velmi tvrdý a křehký magnet. Jediným způsobem opracování do požadovaného tvaru je broušení. K výhodám feritových permanentních magnetů patří jejich nízká cena, možnost výroby v různých tvarech a velikostech. Používají se hlavně v jednoduchých a levných stejnosměrných motorech s komutátorem.

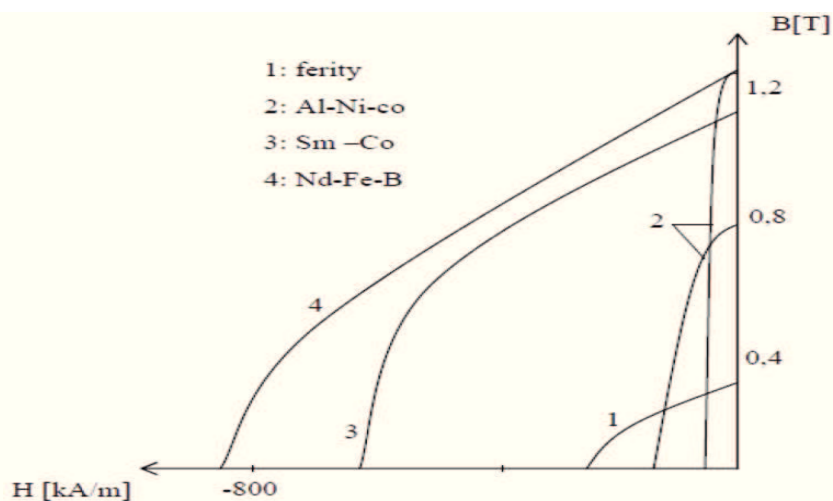
3.2.4.2 Alnico

Tyto permanentní magnety jsou vyráběny ze směsí hliníku, niklu, kobaltu, železa, mědi a titanu (Al, Ni, Co, Fe, Cu, Ti). Vyrábějí se metodou slévání, která umožňuje pomocí přesných forem vytvoření magnetů různých tvarů. Magnety AlNiCo mají po magnetech ze vzácných zemin největší magnetickou energii, koercivitu a remanenci. Jsou také velice odolné vůči kyselinám, rozpouštědlům a mají vysokou pracovní teplotu. Tyto magnety jsou také velice tvrdé a křehké a jedinou možností jejich opracování je metodou broušení. Alnico magnety se používají ve středně velkých elektromotorech.

3.2.4.3 Slitiny vzácných zemin

Magnety vyráběné ze slitin vzácných zemin mají výrazně lepší vlastnosti než feritové magnety nebo magnety typu AlNiCo. Vyrábějí se jako magnety NdFeB (Neodym-Železo-Bór) nebo

SmCo (Samarium-Cobalt) procesem práškové metalurgie a následným spékáním v metalurgické peci v prostředí interního plynu. Tyto magnety jsou v dnešní době nejsilnějšími permanentními magnety a mají nejlepší magnetické vlastnosti jako je energetická hustota a remanence. Mezi nevýhody těchto magnetů patří jejich extrémní cena, velká křehkost, tvrdost, náchylnost ke korozi a teplotní závislost. Kvůli velké tvrdosti a křehkosti těchto magnetů je opracování možné pouze broušením, přičemž je třeba dát pozor na to, aby se při broušení příliš nezahřály. Ochrana proti korozi je u těchto magnetů provedena poniklováním, epoxidovou pryskyřicí nebo zinkem. Magnety ze slitiny vzácných zemin se používají u motorů s vysokými požadavky na rozměry, hmotnost a dynamiku. Na následujícím obrázku Obr. č.3.8 jsou znázorněny závislosti remanentní (zbytkové) indukce na koercitivní síle pro vybrané materiály.

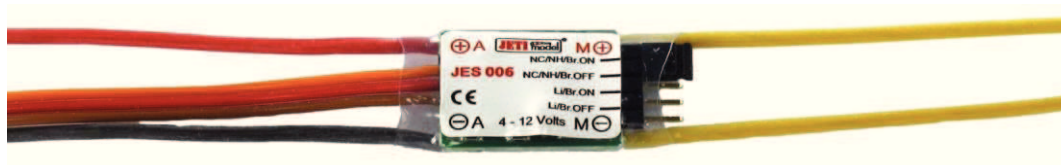


Obr. č.3.11 Demagnetizační křivky pro jednotlivé druhy materiálů

4. Funkce regulátoru stejnosměrného elektromotorku

K řízení otáček elektromotorů se používají regulátory. Tyto regulátory můžeme rozdělit na regulátory jednosměrné a obousměrné. Pro řízení otáček elektromotorků používaných v leteckém modelářství, resp. v modelech letadel se používají téměř výhradně regulátory jednosměrné. Jedsměrné regulátory umožňují řízení otáček pouze v jednom směru (obousměrná regulace není potřeba). Pro řízení regulátorů se používají mikroprocesory a většinu dnes vyráběných regulátorů lze předem naprogramovat, což znamená, že lze měnit některé jejich vlastnosti podle potřeby modelu.

Součástí regulátorů používaných v leteckém modelářství mohou být i další obvody, jako je stabilizátor napájení (BEC), ochranné obvody proti proudovému a tepelnému přetížení, brzda (Brake) a obvod odpojící motor při poklesu napájecího napětí. Stabilizátor napájení (BEC) vytváří stabilizované napětí (5V) pro napájení přijímače a serv umístěných v modelu a tím odpadá nutnost použít k napájení těchto zařízení další zvláštní akumulátor. Ochranné obvody proti proudovému a tepelnému přetížení slouží k ochraně samotného regulátoru a napájecích článků. V situaci, kdy hrozí brzké vybití napájecích článků nebo přehřátí samotného regulátoru v důsledku přetížení, automaticky sníží otáčky motoru nebo jiným způsobem na tuto situaci upozorní (například zvukovým signálem). V případě, že hrozí úplné vybití napájecích baterií, odpojí ochranné obvody napájecí zdroje zcela od motoru (napájeny zůstanou pouze přijímač a serva) a to z důvodu, aby nedošlo k jejich poškození nadměrným vybitím. Brzdu lze zpravidla podle potřeby vypnout a zapnout (mechanicky propojkou nebo programově) a slouží k zastavení motoru, například pro sklopení vrtule u motorového větrone.



Obr. č. 4.1 Regulátor pro stejnosměrné motorky

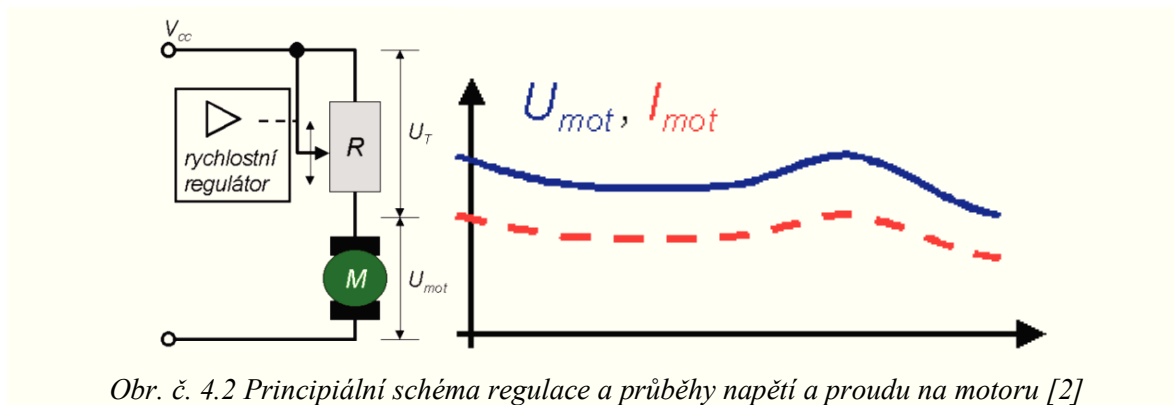
Podle principu funkce můžeme regulátory pro stejnosměrné elektromotorky rozdělit na:

- lineární proudový regulátor
- pulzní proudový regulátor

4.1 Lineární proudový regulátor

Tento typ regulátoru je tvořen výkonovými polovodičovými členy, nejčastěji výkonovými tranzistory. „Na Obr. č 4.2 je zobrazen princip tohoto regulátoru, kde výkonový tranzistor řízený rychlostním regulátorem je schematicky zobrazen reostatem R. Celkové napájecí napětí V_{CC} se rozdělí na úbytek na výkonovém tranzistoru U_T a úbytek U_{mot} na motoru. Na tranzistoru vznikají ztráty $P_V = R \cdot I^2$, které se přemění v teplo.“ [citace lit. 7.]

Jedná se o starší typ regulátoru, který se v dnešní době pro regulaci elektromotorků v leteckém modelářství téměř nepoužívá. Pro možnost obousměrné regulace se používá zapojení tranzistorů do můstku. Mezi výhody tohoto způsobu regulace patří nízká cena, jednoduchá elektronika a slabé elektromagnetické rušení. Velkou nevýhodou těchto regulátorů jsou jejich výkonové ztráty, a proto je tento typ regulace výhodný pouze řádově do výkonu desítek wattů. Pro vyšší výkony je tento druh regulace ne hospodárný a je lepší využít regulaci pulzní.

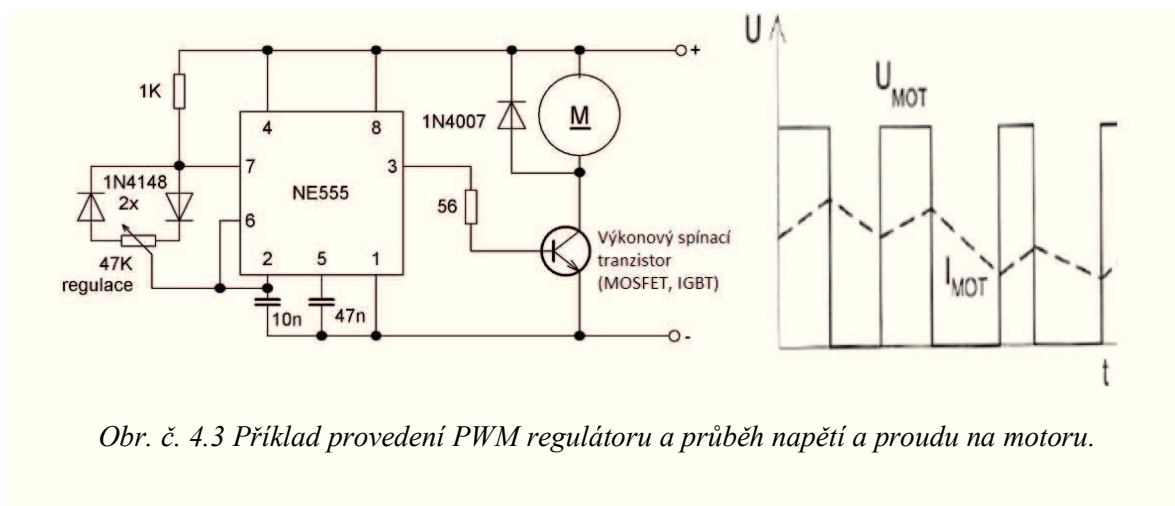


Obr. č. 4.2 Principiální schéma regulace a průběhy napětí a proudu na motoru [2]

4.2 Pulzní proudový regulátor

Tyto regulátory pracují na principu pulzní šířkové modulace – PWM (Pulse width modulation). Jedná se o regulaci využívající změny šířky proudového impulsu do motoru a tím se liší od lineární (spojité) regulace proudu, kde nedochází jen ke snižování proudu ale i napětí. Při PWM regulaci je konstantní napájecí rozdělěno do impulsů s konstantní frekvencí a s řízenou šířkou impulsu. Napájecí napětí a proud jsou tedy konstantní a mění se pouze aktivní doba průchodu proudu motorem.

K samotnému spínání se používají výkonové tranzistory (IGBT nebo MOSFET), které mají nízký odpor v sepnutém stavu a jsou řízeny prostřednictvím PWM signálu generovaného řídicí jednotkou (procesorem) regulátoru. Tyto výkonové tranzistory jsou buď zcela zavřeny, nebo otevřeny a jejich spínací frekvence je řádově v desítkách kHz. Pro ovládání otáček motoru v jednom směru je možné použít zapojení s jedním výkonovým tranzistorem, které ovšem neumožňuje změnu směru otáčení a ani brzdění motoru, a proto se častěji používá zapojení se čtyřmi tranzistory v můstkovém zapojení.



Obr. č. 4.3 Příklad provedení PWM regulátoru a průběh napětí a proudu na motoru.

Mezi výhody těchto regulátorů patří to, že takto regulovaný motor má větší krouticí moment i při nižších otáčkách a regulace je prakticky bezztrátová, protože výkonové tranzistory jsou buď sepnuty, nebo rozepnuty a následkem toho na nich nedochází k téměř žádným ztrátám. Mezi nevýhody těchto regulátorů patří vznik elektromagnetického rušení v důsledku spínání výkonových tranzistorů.

5. Princip funkce bezkartáčového elektromotorku

Tyto motory jsou zvláštním typem synchronního motoru. V literatuře se lze setkat s různými názvy těchto motorů jako EC motory (Electronically Commutated Motor), BLDC motor (Brushless Direct Current Motor - BLDC motor) nebo také bezkartáčový stejnosměrný motor. Bezkartáčové elektromotory jsou motory s elektronickou komutací namísto mechanické pomoci kartáčů a komutátoru.

Největší motivací pro vznik bezkartáčového elektromotorku byla snaha odstranit nejslabší místo klasických DC motorů při zachování jejich výhod. Tyto výhody jsou především velký záběrný moment, několikanásobná přetížitelnost, nízká časová konstanta a malé rozměry. Největší nevýhoda klasického DC motoru je použití mechanického komutátorového systému (komutátor a kartáče), protože vyžadují pravidelnou údržbu (čištění komutátoru, zabrušování a výměnu kartáčů), jsou zdrojem elektromagnetického rušení a také omezují rychlost otáčení motoru. U bezkartáčových motorů je mechanický komutátorový systém nahrazen elektronikou. Díky tomu mají bezkartáčové motorky proti klasickým motorkům řadu výhod, jako například:

- vyšší účinnost
- vyšší rychlost otáčení (řádově desítek tisíc otáček)
- delší životnost (prakticky závisí jen na životnosti ložisek) a minimální nároky na údržbu
- tichý chod
- menší hmotnost a rozměry
- nízký moment setrvačnosti
- spolehlivost

Tyto motorky mají ovšem také i nevýhody:

- nutnost složitější řídicí jednotky a výkonové části
- omezená pracovní teplota z důvodu demagnetizace permanentní magnetů
- vyšší cena, která je určena především cenou permanentních magnetů a složitější konstrukcí

Obvykle se uvažují dvě kategorie těchto motorů podle tvaru magnetické indukce ve vzduchové mezeře

- motor s obdélníkovým polem (prakticky je to spíše trapézové pole)
- motor se sinusovým polem (polem otáčejícím se konstantní rychlostí)

Motor s obdélníkovým polem je elektronicky komutovaný stejnosměrný motor, zatímco motor se sinusovým polem je v podstatě synchronní motor buzený permanentními magnety. Konstrukce obou typů motorů je v podstatě stejná, liší se pouze v řízení a s tím související snímání polohy rotoru těchto motorů. Elektronicky komutovaný motor vyžaduje pouze diskrétní snímání

polohy rotoru vždy po 60° elektrických, zatímco synchronní motor buzený permanentními magnety vyžaduje trvalou informaci o poloze rotoru.

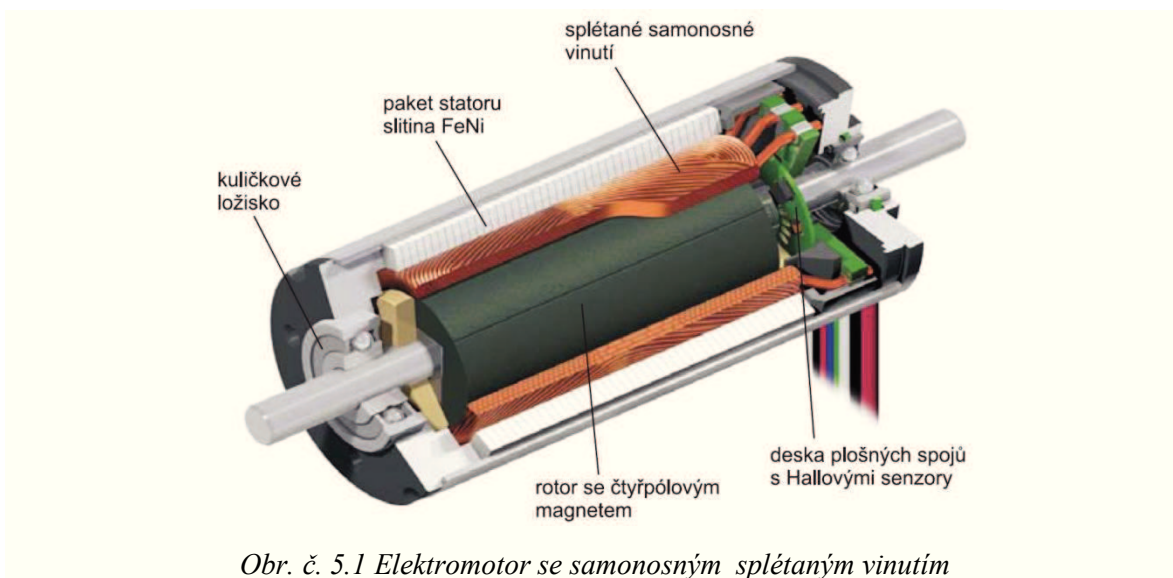
5.1 Konstrukce bezkartáčového elektromotorku

Hlavním konstrukčním rozdílem bezkartáčových elektromotorků proti komutátorovým elektromotorkům je, že permanentní magnety jsou umístěny na rotoru a vinutí jednotlivých fází je uloženo ve statoru. To znamená, že u tohoto typu motoru rotují permanentní magnety a vinutí statoru je statické – nepohybuje se. Funkci komutátoru zde přebírá elektronika.

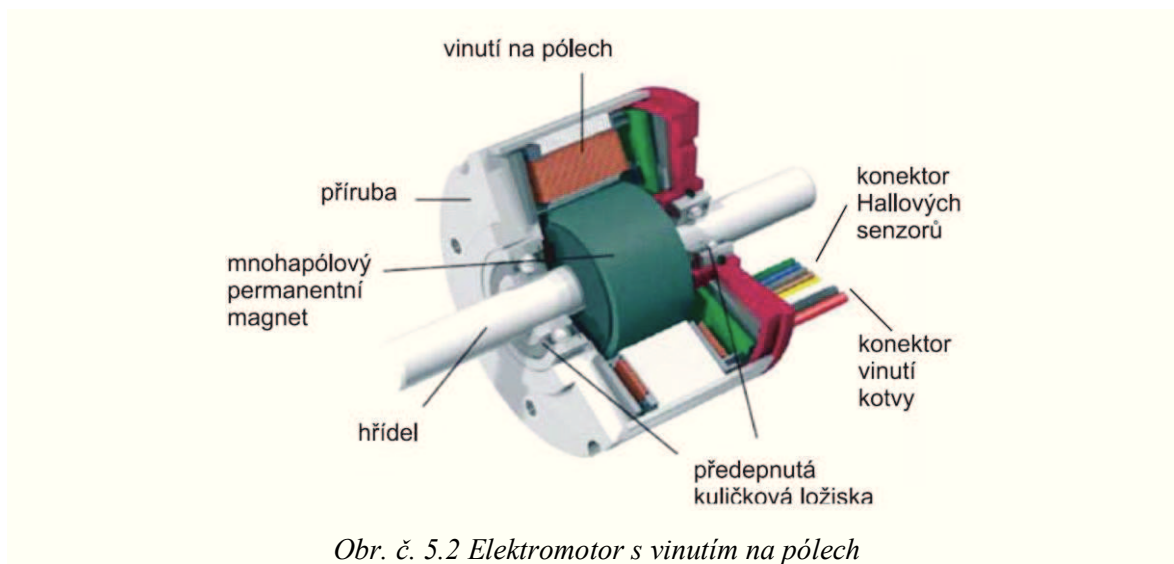
Tyto motory můžeme dále rozlišit podle uspořádání statoru a rotoru a to na motory s vnějším rotorem a motory s rotorem vnitřním. Dále můžeme motory rozdělit podle provedení statorového vinutí a to na motory s homogenním vinutím a motory se soustředěným vinutím umístěným na pólech statoru.

5.1.1 Stator

Stator bezkartáčového elektromotorku se konstrukčně podobá standardnímu statoru synchronního nebo asynchronního stroje. Je složen z desetin milimetru silných plechů, které jsou vyrobeny z křemíkové oceli s obsahem Si do 4,5% (dynamové plechy). Jednotlivé plechy jsou od sebe vzájemně odizolovány tenkou vrstvou speciálního laku nebo keramickou vrstvou. Tato izolace je nutná z důvodů snížení hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy. Na statoru je potom umístěno statorové nejčastěji třífázové vinutí zapojené do hvězdy nebo trojúhelníku, které může být provedeno jako homogenní vinutí nebo soustředné vinutí umístěné na pólech. Motory s homogenním statorovým vinutím se vyrábějí pouze v provedení s vnitřním rotorem. Statorové vinutí je umístěno buď v drážkách paketu statoru, nebo je provedeno jako samonosné splétané vinutí a je umístěno pod paketem statoru. Motory tohoto typu provedení mají plynulý chod bez zvlnění momentu, nemají reluktanční moment a nejsou tedy zdrojem vibrací.



Motory se soustředným vinutím umístěným na pólech mohou být provedeny jako motory s vnitřním rotorem nebo motory s vnějším rotorem (nejčastěji diskový tvar). Toto vinutí je provedeno jako soustředné cívky, které jsou umístěny na vyniklých pólech. Takto provedené motory vykazují obvykle větší moment než motory s homogenním vinutím, ale zároveň menší rychlost otáčení.



Obr. č. 5.2 Elektromotor s vinutím na pólech

5.1.2 Rotor

Rotor bezkartáčového elektromotorku může být uspořádán s magnety na povrchu, s magnety umístěnými uvnitř těla rotoru nebo s vestavěnými magnety. Hlavní předností uspořádání s magnety na povrchu je nenáročnost výroby, jelikož magnety se na rotor pouze lepí. Naproti tomu výhodou dalších dvou uvedených provedení je větší mechanická odolnost. U provedení rotoru s magnety na povrchu nebo s vestavěnými magnety nedochází ke koncentraci magnetického toku a magnetická indukce v mezeře odpovídá indukci permanentních magnetů. Oproti tomu u rotoru s vestavěnými magnety uvnitř rotoru dochází ke koncentraci magnetického toku pólovými nástavci.

Rotor je nejčastěji vytvořen v celku z magneticky měkké konstrukční oceli. Použití plechů není teoreticky nutné, jelikož střídavá složka magnetické indukce je v rotoru nulová – rotor je sycen pouze stejnosměrně od svých permanentních magnetů. To ovšem zcela neplatí, jelikož v praxi vzniká i střídavá magnetizace. Při otáčení rotoru totiž dochází k zvlnění průběhu budícího magnetického toku - reluktanční pulzaci. Toto zvlnění představuje jen malý rozkmit indukce, ale i přesto je jeho kmitočet značný a je přímo úměrný počtu drážek stroje. Z toho vyplývá, že při použití statoru z plného materiálu bude docházet k nezanedbatelným vířivým ztrátám.

Permanentní magnety umístěné na rotoru jsou jeho nedílnou součástí. Nejčastěji se jako materiál pro výrobu používá chemických sloučenin vzácných zemin (samarium-kobalt, neodým-železo-bor), nebo tvrdých feritů (Durox atd.), které ovšem nemají tak dobré magnetické vlastnosti. Druhy a vlastnosti permanentních magnetů jsou podrobně rozebrány v kapitole 3.2.4 - Permanentní magnety

5.1.3. Způsoby konstrukčního uspořádání bezkartáčových motorků

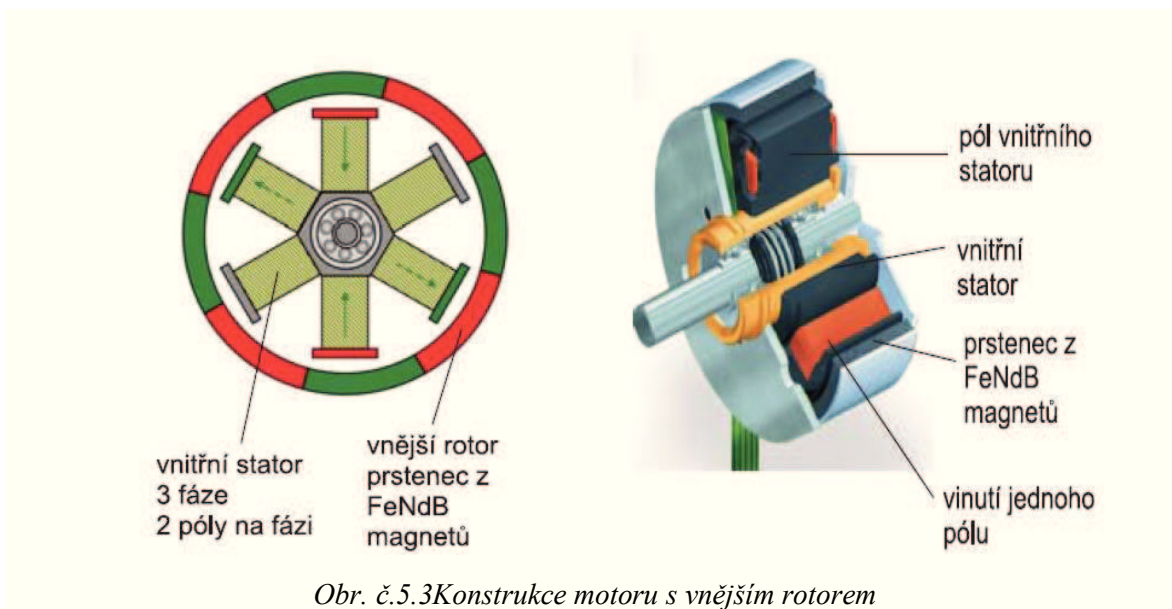
Podle způsobu konstrukce lze bezkartáčové motorky rozdělit na motorky s vnitřním rotorem a motorky s vnějším rotorem. Elektrické vlastnosti obou řešení jsou si zcela rovnocenné.

5.1.3.1 Konstrukce s vnitřním rotorem

Tělo (plášť) motoru je tvořeno válcem z feromagnetického materiálu, na jehož vnitřní straně je na pólech nebo v drážkách upevněno statorové třífázové vinutí. V čelech statoru jsou upevněna ložiska (kuličková nebo kluzná), kterými prochází hřídel rotoru. Na hřídeli je nalisován nebo nalepen vícepólový permanentní magnet. U některých motorů může být rotor a stator vybaven zařízením pro snímání polohy rotoru. Příklad tohoto motoru je na Obr. č. 5.1 a 5.2.

5.1.3.2 Konstrukce s vnějším rotorem

Tyto motorky jsou vzhledem ke své konstrukci označovány také jako motory s rotačním pláštěm, diskové motorky nebo zkráceně jen „oběžky“. Stator motoru s vnějším rotorem (rotačním pláštěm) je složen z elektrotechnických plechů a statorové vinutí je uloženo na pólových nástavcích nebo v drážkách. Stator bývá obvykle v ose průchozí a jsou v něm uložena ložiska. Těmito ložisky prochází hřídel, na jejímž konci je upevněn disk rotoru. Na disku jsou z vnitřní strany připevněny nejčastěji lepením magnety. Magnety mohou být do rotoru vlepeny jako jednotlivé segmenty nebo v celku ve tvaru prstence. Výhodou motoru s vnějším rotorem je lepší chlazení, naopak nevýhodou je možné poškození točícího se rotoru při kontaktu s jiným předmětem. U některých motorů může být rotor a stator vybaven zařízením pro snímání polohy rotoru. Příklad tohoto motoru je na Obr. č. 5.3



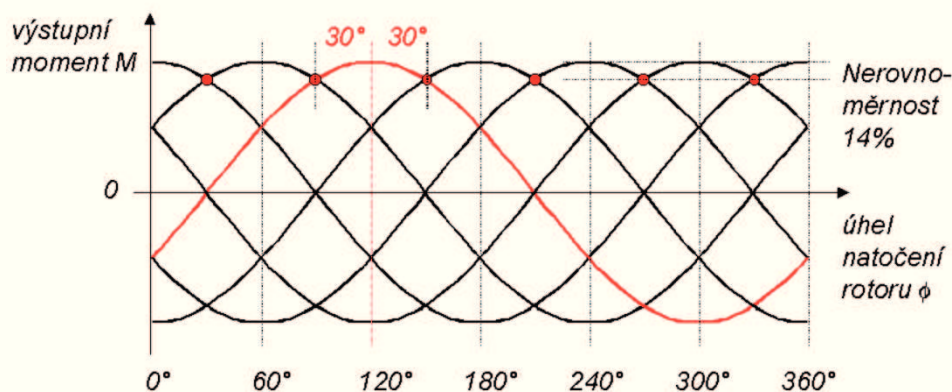
5.2 Princip funkce bezkartáčového motorku

Princip funkce bezkartáčového motoru je analogický principu stejnosměrného komutátorového motoru a spočívá na vzájemném udržování vzájemné kolmosti (90°) dvou magnetických polí – statoru a rotoru. U klasických stejnosměrných motorů toho docílíme pomocí mechanického komutátoru, který má ovšem mnoho nevýhod. U bezkartáčových motorů je proto komutace provedena elektronicky s pomocí polovodičových spínacích prvků.

5.2.1 Elektronická komutace motorku

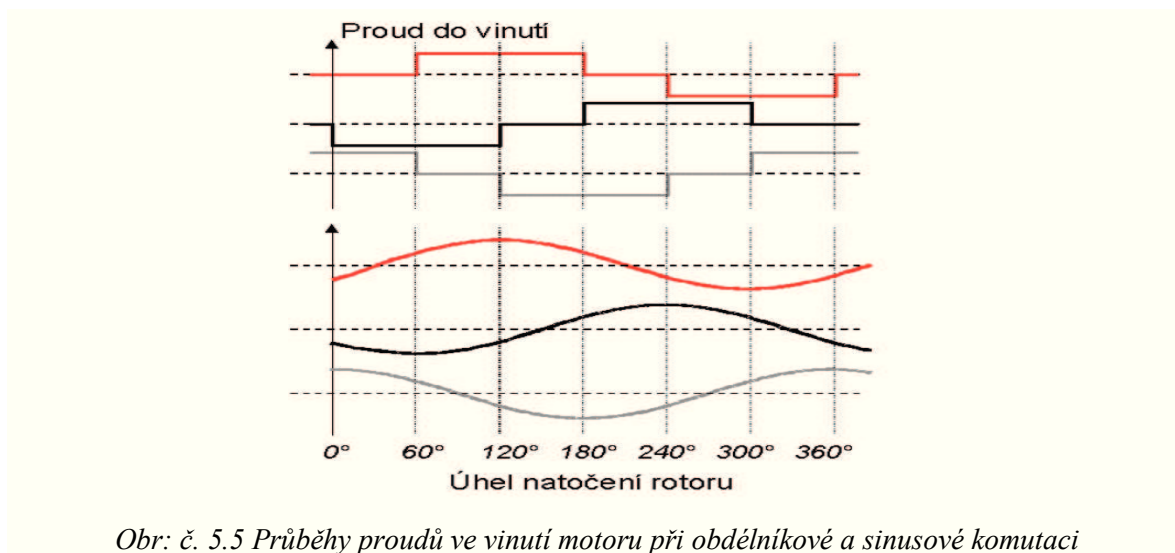
Elektronická komutace motoru je založena na principu postupného spínání jednotlivých fází vinutí. Stejnosměrné napětí je střídavě připojováno ke dvěma ze tří vinutí, kde jedno je napájeno kladným napětím (proud vstupuje do vinutí) a druhé vinutí je napájeno záporným napětím (proud vystupuje z vinutí), třetí vinutí zůstává nenapájeno (nevybuzeno) a neprochází jím žádný proud. Tím vznikne ve statoru magnetické pole, do něhož je vtahován rotor s permanentními magnety. Interakcí mezi magnetickým polem generovaným statorovým vinutím a magnetickým polem permanentních magnetů umístěných na rotoru vzniká krouticí moment. Tento krouticí moment je největší v okamžiku kdy jsou magnetická pole na sebe kolmá (90°). Pro správný chod motoru je důležité, aby se magnetické pole generované statorem neustále posouvalo vůči magnetickému poli rotoru. Toho dosáhneme postupným spínáním jednotlivých fází vinutí. Spínání jednotlivých fází vinutí je prováděno elektronickými spínacími obvody. Ke stanovení správného okamžiku pro spínání a rozepínání jednotlivých fází vinutí je nutné znát okamžitou polohu rotoru vůči statoru. Tato informace se získává pomocí snímačů polohy rotoru, nebo bezsenzorovým vyhodnocením polohy rotoru.

Výše uvedené platí pro obdélníkovou (trapézovou) komutaci. Ke změně proudu v jednotlivých fázích vinutí dochází skokem. Komutace probíhá vždy 30° elektrických před a 30° elektrických za optimální polohou statoru vůči rotoru, a následkem toho je výstupní moment na hřídeli motoru zvlněn. Toto zvlnění se nejvíce projeví při malých rychlostech, kdy motory s malým vlastním momentem setrvačnosti nemají dostatek rotační kinetické energie pro vyhlazení poklesů momentu.



Obr: č. 5.4 Zvlnění mechanického momentu při obdélníkové komutaci

Pulzaci momentu motoru lze eliminovat využitím sinusové komutace, při které je změna proudu plynulá a kolísání momentu je teoreticky nulové. Velkou nevýhodou této varianty ovšem je potřeba znalosti přesné polohy rotoru detekované inkrementálními čidly nebo resolvery.



5.2.2 Snímání polohy rotoru

Jak již bylo uvedeno v předchozím textu, pro řízení motoru elektronickou komutací ne nutně znát polohu natočení rotoru vůči statoru. K získávání informací o této poloze je možné použít několik metod. O použití určitého druhu metody snímání polohy rozhodují požadavky na pracovní prostředí, dynamiku řízení, preciznost a cenu.

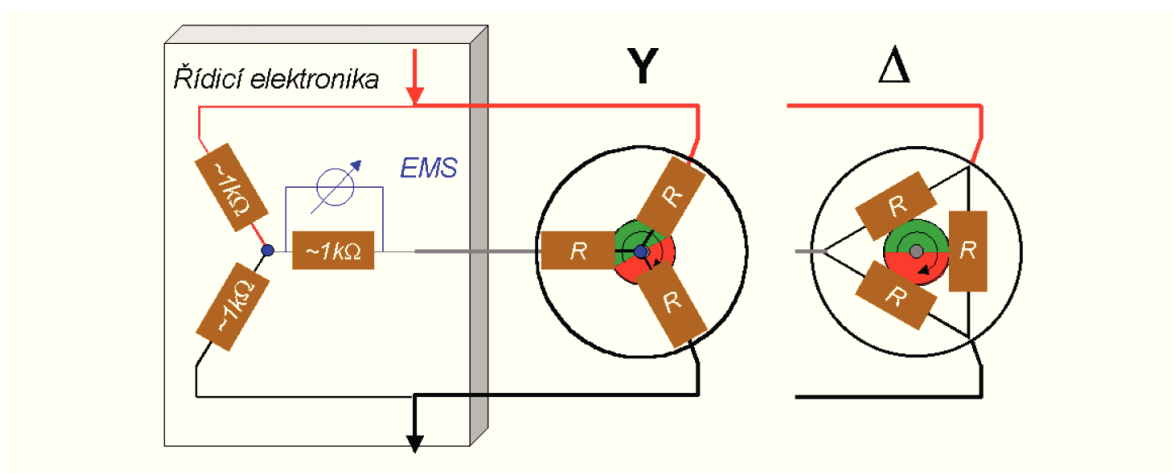
Mezi metody získávání informace o poloze rotoru patří:

- Hallovy sondy
- optický inkrementální snímač polohy
- absolutní optický snímač polohy
- tachodynamo
- resolver
- bezsenzorové snímání polohy (s využitím zpětné vazby back EMF)

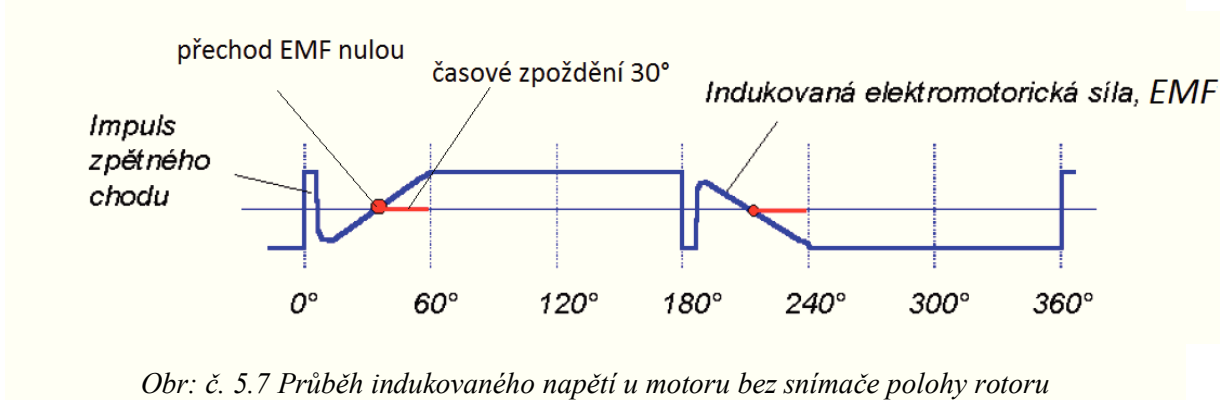
Pro potřeby regulace modelářských bezkomutátorových motorků je nejvýhodnější volbou použití bezsenzorového snímání polohy rotoru. Tato metoda spočívá v tom, že v nenapájené fázi vinutí se vlivem změny magnetického pole při otáčení motoru generuje napětí, které se nazývá: „zpětná elektromotorická síla“, neboli back EMF (zpětná EMS). Toto napětí je úměrné rychlosti motoru a zpětně se přivádí do regulátoru, ve kterém se vyhodnocuje průběh tohoto indukovaného napětí nulou. Během jedné otáčky rotoru se snímá průběh nulou šestkrát.

Průběh napětí nulou musí být vždy, jinak by se motor neotočil. Na základě těchto informací potom software regulátoru vyhodnocuje polohu rotoru a upravuje komutaci.

Výhodou tohoto způsobu snímání polohy rotoru je jeho jednoduchost a také to, že motor nemusí být vybaven snímači polohy, jelikož snímání polohy probíhá v regulátoru. Podstatnou nevýhodou je, že při stojícím rotoru je indukované napětí nulové. Motor se tedy musí otáčet alespoň minimálními otáčkami, aby bylo možné indukované napětí měřit. U modelářských regulátorů se proto využívá předprogramování regulátoru pro rozběh a po rozběhu motoru už lze indukované napětí měřit.



Obr: č.5.6 Komutace motoru bez snímače polohy rotoru, zapojení rotoru do hvězdy a trojúhelníku



Obr: č. 5.7 Průběh indukovaného napětí u motoru bez snímače polohy rotoru

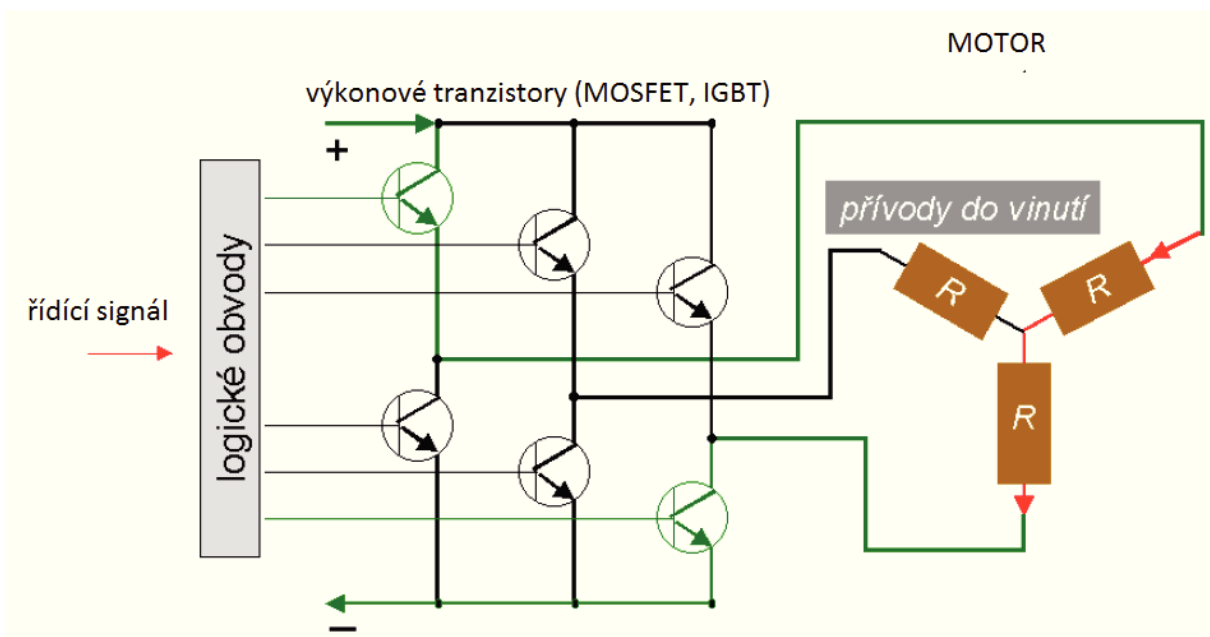
5.3 Řízení rychlosti (otáček) bezkartáčového motoru

U bezkartáčových elektricky komutovaných motorů je řízení otáček realizováno regulací napájecího napětí. K tomu se využívá pulzní šířková modulace PWM (Pulse Width Modulation), kde průměrná hodnota napájecího napětí je dána střídou signálu. Nepísaným pravidlem je, že frekvence řízení by měla být alespoň desetkrát vyšší než je frekvence otáčení motoru. Řízení je podrobněji rozebíráno v následující kapitole.

6. Funkce regulátoru bezkartáčového elektromotorku

Regulátory pro bezkartáčové elektromotorky mají stejné základní vlastnosti a funkce jako PWM regulátory pro komutátorové motorky (viz. Kapitola č. 4 Funkce regulátoru stejnosměrného elektromotorku) a liší se pouze tím, že u bezkartáčového elektromotorku vykonávají také funkci elektronického komutátoru.

Statorové vinutí bezkartáčového elektromotorku je zapojeno do hvězdy nebo trojúhelníku a prostřednictvím regulátoru je napájeno obdélníkovými proudovými impulzy střídavé polarity s délkou trvání vždy 120° elektrických (v době mezi komutacemi jsou vždy napájeny pouze dvě fáze motoru). K napájení motoru se používá napěťový střídač zapojený jako třífázový můstek osazený výkonovými spínacími tranzistory (nejčastěji MOFET nebo IGBT) a pracující s pulzní šířkovou modulací (PWM). Při PWM regulaci je konstantní napájecí rozdělno do impulzů s konstantní frekvencí a s řízenou šířkou impulzu. Napájecí napětí a proud jsou tedy konstantní a mění se pouze aktivní doba průchodu proudu motorem. U bezkartáčového elektromotorku jsou napájeny vždy pouze dvě fáze statorového vinutí a vždy po pootočení rotoru o 60° elektrických dojde k přepnutí proudu do následující nenapájené fáze statorového vinutí. Přepínání je řízeno procesorem regulátoru v závislosti na poloze rotoru, která se zjišťuje pomocí zpětné EMS z právě nenapájené fáze statoru. Příklad provedení výkonové části regulátoru je na Obr. č. 6.1.



Obr. č. 6.1 Můstkové zapojení výkonových tranzistorů u třífázového regulátoru pro bezkartáčové elektromotorky.

7. Měření na elektromotorcích

V současné době se na trhu vyskytuje velké množství elektromotorů malých a středních výkonů, jejichž specifické vlastnosti určují jejich konkrétní použití. Proto se provádí řada zkoušek a měření, jejichž účelem je zjistit přesné parametry měřených elektromotorů. V leteckém modelářství je měření vlastností elektromotorků velice důležité, protože volba správného elektromotorku ovlivní celou pohonnou soustavu modelu a také jeho celkové vlastnosti.

Mezi nejčastěji měřené veličiny na elektromotorcích malého a středního výkonu patří:

- otáčky [ot/min]
- krouticí moment [mN.m]
- proud [A]
- příkon [W]
- výkon [W]
- účinnost [%]

Tyto naměřené veličiny se poté nejčastěji s použitím výpočetních programů zapracovávají do podoby průběhů – charakteristik. Mezi nejčastěji zobrazované charakteristiky patří:

- momentová charakteristika (závislost momentu motoru na zatěžovacím proudu $M = f(I)$)
- mechanická charakteristika (závislost otáček na zatěžujícím momentu $n = f(M)$)
- rychlostní charakteristika (závislost otáček na zatěžovacím proudu motoru $n = f(I)$)

7.1. Zařízení používaná k měření vlastností malých elektromotorků

Pro samotné měření vlastností elektromotorků existuje velké množství postupů a měřících přístrojů. Mezi jednodušší postupy měření, které byly často využívány v minulosti, patří zejména měření elektromotorků s využitím miniaturní pásové brzdy. Tento způsob měření byl ovšem časově náročný a neposkytoval dostatečně přesné výsledky. Mezi další relativně jednoduchá měření lze zařadit i měření statického tahu motoru s určitou vrtulí. Toto měření provádí často i sami výrobci modelářských elektromotorků a to hlavně z důvodu určení optimálního rozměru vrtule pro daný motor, ale také pro přibližnou představu výkonu motoru, který se v tomto případě udává v podobě statického tahu motoru s danou vrtulí při určité velikosti napájecího napětí.

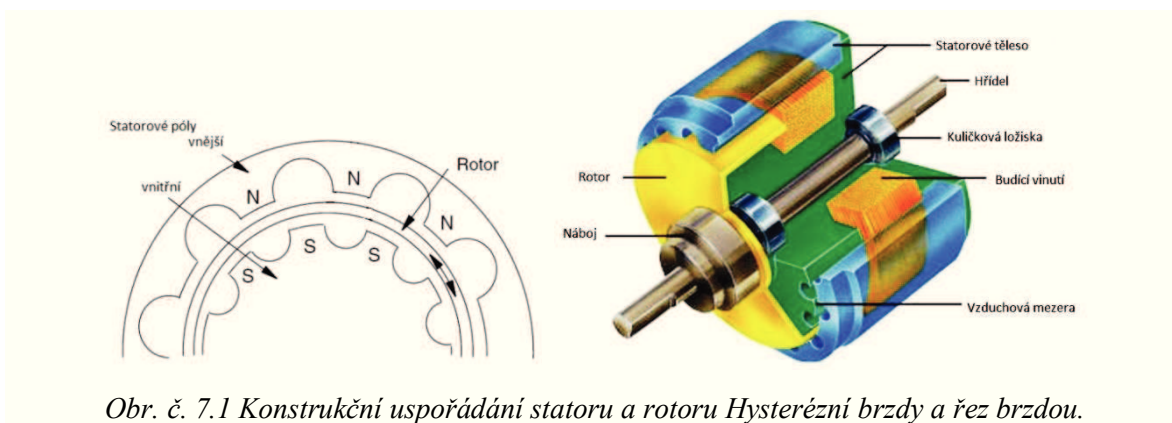
Další možností měření je použití elektrických dynamometrů. Tento způsob patří v současné době k nejkvalitnějším a nejpřesnějším způsobům měření vlastností elektrických motorků. Používané dynamometry můžeme rozdělit podle způsobu, jakým tyto dynamometry vyvíjejí brzdný moment a to na:

- dynamometry s hysterézní brzdou
- dynamometry s vířivou brzdou
- dynamometry s práškovou brzdou

Jako nejvhodnější pro měření elektromotorků malého a středního výkonu se potom jeví použití dynamometru s hysterézní brzdou.

7.1.1 Dynamometr s hysterézní brzdou

Tento typ dynamometru vyvíjí brzdící krouticí moment pomocí hysterézní brzdy. Tato hysterézní brzda se skládá ze dvou částí a to rotoru ve tvaru bubínku, který je umístěný ve vzduchové mezeře statoru a pólově strukturovaným statorovým tělesem. Toto konstrukční uspořádání je zobrazeno na Obr. č. 7.1.



Obr. č. 7.1 Konstrukční uspořádání statoru a rotoru Hysterézní brzdy a řez brzdou.

Uvnitř statorového tělesa je uloženo budící vinutí. Jakmile tímto budícím vinutím začne procházet stejnosměrný proud, vytvoří se na statoru magnetické pole. Díky konstrukčnímu provedení statoru, který je složen z vnitřních a vnější pólů vzniká na statoru střídavě severní a jižní pól. Magnetické pole z těchto pólů indukuje ve stěnách rotoru soubor protipólů. Brzdný moment je potom vytvořen vzájemným působením magnetických sil mezi póly indukovanými v rotoru a statoru a to tím způsobem, že souhlasné póly se odpuzují a nesouhlasné přitahují. Pokud se rotor otáčí v důsledku působení vnějších sil, snaží se magnetické pole statoru přemagnetovat magnetické pole rotoru. Brzdný výkon hysterézní brzdy je tedy úměrně závislý na velikosti proudu, který protéká budícím vinutím resp. vzniklým magnetickým tokem mezi póly statoru a rotorem. Rotor hysterézní brzdy je vyroben z magneticky tvrdého materiálu, což znamená, že odolává změně magnetizace (má širokou hysterézní smyčku) a následkem toho vznikají v rotoru ztráty, které se mění na teplo. Se zvyšující se teplotou rotoru ovšem klesá brzdný moment (teplota ovlivní šířku hysterézní smyčky materiálu, z něhož je vyroben rotor) a proto musí být rotor dostatečně chlazen. Toto chlazení je nejčastěji provedeno přidavnými ventilátory, které zajistí potřebné chlazení. Pro brzdy s větším výkonem je možné použít také vodní chlazení. Řez hysterézní brzdou je zobrazen na Obr. č. 7.1

Výhodou hysterézní brzdy je, že poskytuje maximální krouticí moment od nulových otáček a také to, že díky své konstrukci umožňuje měřit vysokootáčkové elektromotory. Dynamometry s hysterézními brzdami je vybaveno i pracoviště pro měření elektromotorů malých a středních výkonu, které se nachází v laboratořích VŠB-TUO.

7.2. Měření bezkartáčového elektromotorku

Cílem tohoto měření bylo uvést příklad způsobu měření elektromotorku a porovnat hodnoty uváděné výrobcem motoru a s hodnotami naměřenými ve speciální laboratoři.

7.2.1 Popis měřícího pracoviště

Měření bylo prováděno v laboratoři VŠB – TUO. Tato laboratoř je kompletně vybavena pro realizaci měření elektromotorků malých a velmi malých výkonů. Vybavení laboratoře se skládá ze dvou dynamometrů s hysterezní brzdou:

- MAGTROL HD 400-8NA-0130
- MAGTROL HD 510-8NA-0130

Tyto dynamometry umožňují přesné zatížení kroutícího momentu nezávisle na otáčkách hřídele s maximální hodnotou kroutícího momentu 280 [mNm] a maximálním výkonem 200 [W] po dobu max. 5-ti minut, nebo u výkonnějšího typu dynamometru (MAGTROL HD 510-8NA-0130) zatížení kroutícího momentu nezávisle na otáčkách hřídele s maximální hodnotou kroutícího momentu 850 [mNm], maximálním výkonem 750 [W] po dobu max. 5-ti minut.

Dále se toto pracoviště skládá z:

- Pracovního stolu, který slouží k upevnění všech komponent potřebných k měření.
- Stejnosměrného zdroje MANSON SPS 9400 - rozsah napětí 3 - 15 [V], proud 40 [A].
- Napájecího pultu, který umožňuje napájení elektromotoru regulovatelným zdrojem.
- Vysokorychlostního programovatelného řídicího systému MAGTROL DSP 6001 sloužícího k řízení dynamometrů .
- Jednofázového výkonového analyzátoru MAGTROL 6510e – sloužícího pro číslicové měření stejnosměrných a střídavých hodnot do 10 [kHz] – měří: napětí, proud, výkon VA, frekvenci, činitel výkyvu, účinník a špičkové hodnoty napětí a proudu.
- Switch boxu – sloužícího k přepínání až třech připojených dynamometrů.
- Upínací hlavy k bezpečnému a pevnému uložení elektromotoru.
- Notebook - který je vybaven měřícím softwarem M - TEST 5.0, pomocí kterého je prováděno vlastní měření elektromotoru.
- bočníku a kabeláže



Obr. 7.2 Celkový pohled na měřicí pracoviště

7.2.2 Měření na bezkartáčovém elektromotoru AXI 4120/18 GOLD LINE

Pro měření byl použit elektromotor AXI 4120/18 GOLD LINE vyráběný firmou Modelmotors s.r.o. Jedná se o profesionální střídavý bezkartáčový modelářský elektromotor. Tento motor má široké spektrum použití a je vhodný zejména pro pohon velkých modelů větroňů o hmotnosti do 5000g, motorových a akrobatických modelů do hmotnosti 3500g. Motor je uspořádán v konstrukčním provedení s vnějším rotorem s neohmovými magnety a vinutím uloženým na statorových cívkách.



Obr. č 7.3 Elektromotor AXI 4120/18 GOLD LINE použitý k měření a tabulka technických hodnot udávaných výrobcem.

Jelikož se jedná o bezkartáčový elektromotor tak při jeho měření byl použit střídavý regulátor Jeti Advance 70 Pro vyráběný firmou JETI model s.r.o. Tento regulátor je určen k napájení bezkartáčových elektromotorů s napájecím napětím 5 až 15 [V] a s trvalým proudem do 70 [A]. Napájení regulátoru bylo zajištěno ze stejnosměrného zdroje MANSION SPS 9400, přičemž byla provedena měření pro tři hodnoty napájecího napětí: 8 [V], 12 [V] a 14 [V].

7. MĚŘENÍ NA ELEKTROMOTORCÍCH

Motor byl měřen pomocí hysterézního dynamometru HD 510-8NA-0130 a měřenými veličinami byly:

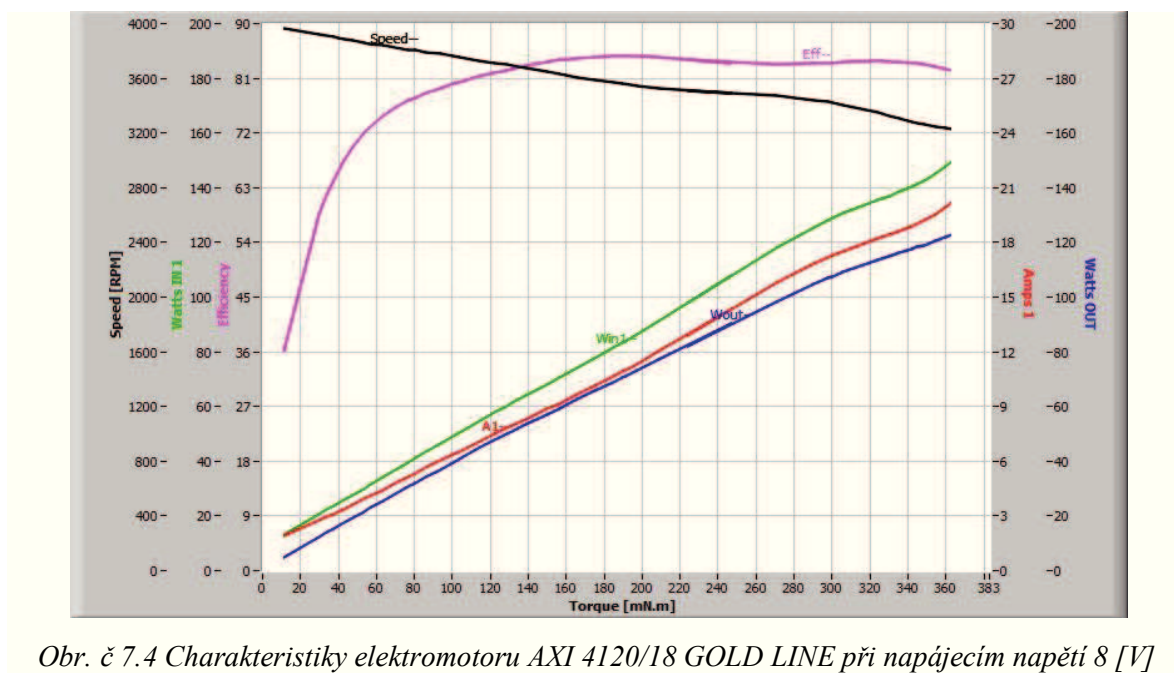
- otáčky [ot/min],
- krouticí moment [mN.m],
- proud [A],
- příkon [W],
- výkon [W],
- účinnost [%].

V následující tabulce jsou uvedeny maximální naměřené hodnoty veličin pro měřená napájecí napětí.

Tab. č.1 Maximální naměřené hodnoty

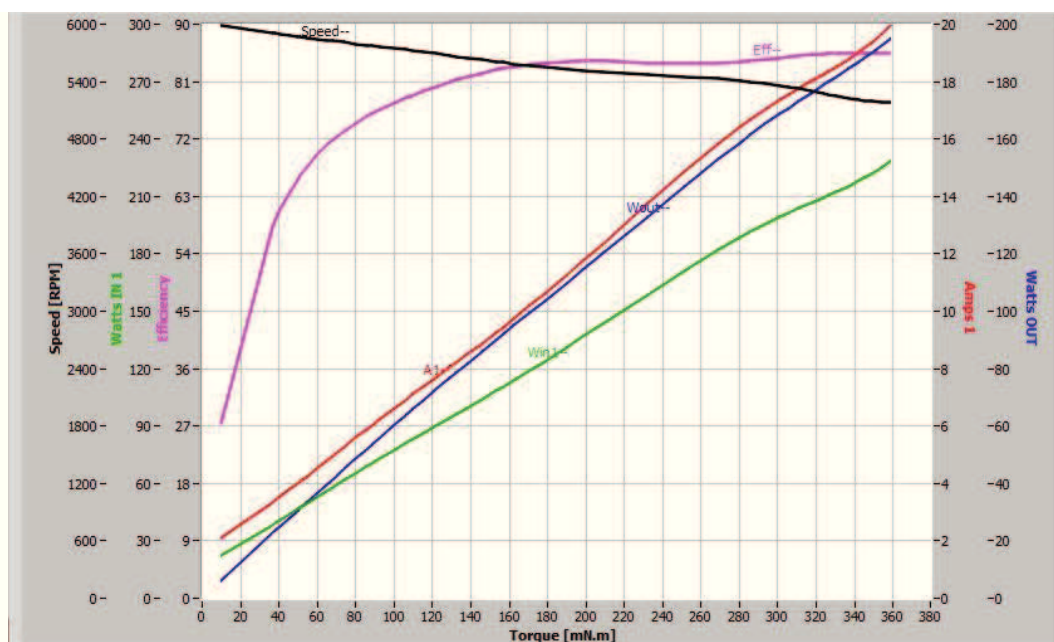
Napájecí napětí [V]	Krouticí moment [mN.m]	Výkon na hřídeli [W]	Proud [A]	Příkon [W]	Otáčky [ot/min]	Účinnost [%]
8	362,95	122,84	20,09	148,8	3968	86,3
12	359,55	194,9	19,93	228,13	5986	86,19
14	353,12	225,12	19,5	262,4	6965	85,97

Následující zobrazené charakteristiky jsou změřené a vytvořené pomocí programu M-TEST 5.0. Všechny naměřené veličiny jsou zobrazené v závislosti na krouticím momentu, protože ten hraje v leteckém modelářství podstatnou roli při výběru správného elektromotoru.

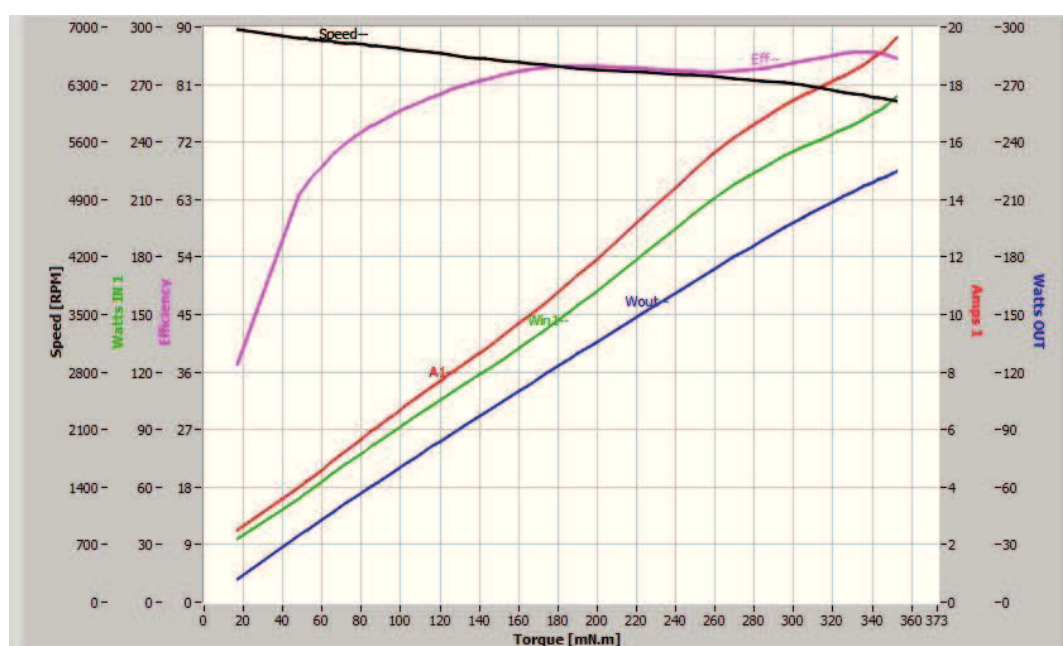


Obr. č 7.4 Charakteristiky elektromotoru AXI 4120/18 GOLD LINE při napájecím napětí 8 [V]

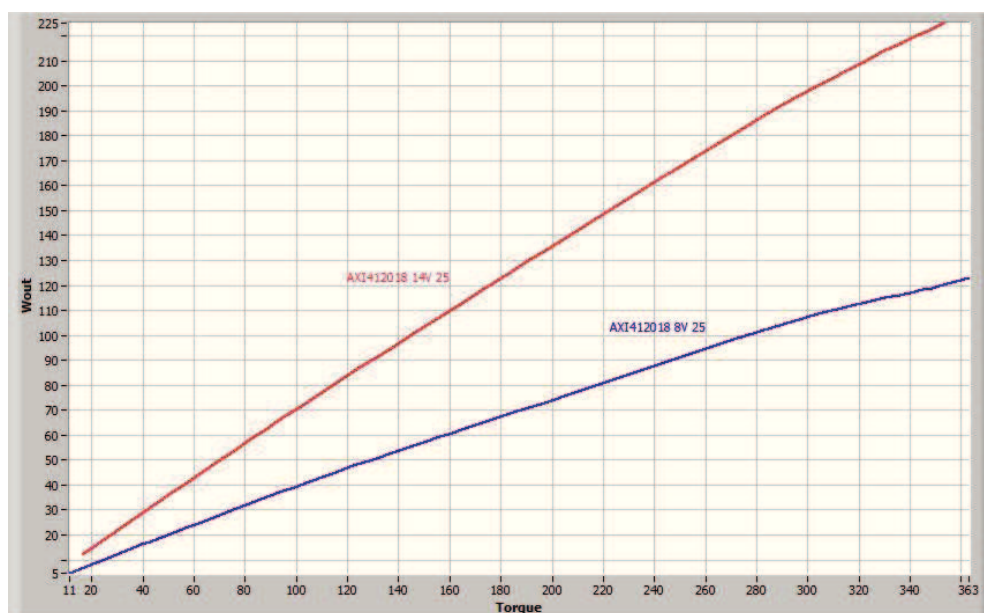
7. MĚŘENÍ NA ELEKTROMOTORCÍCH



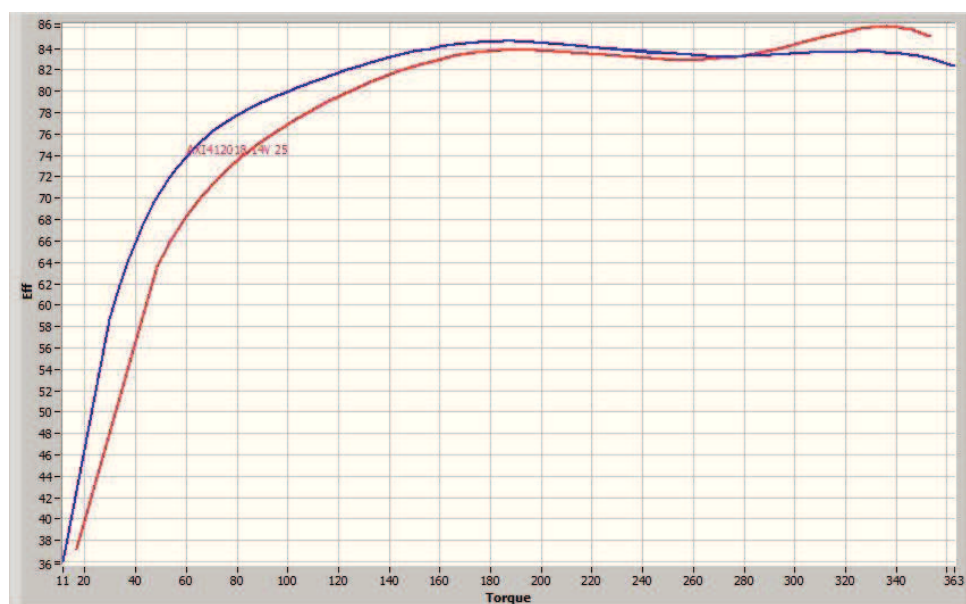
Obr. č 7.5 Charakteristiky elektromotoru AXI 4120/18 GOLD LINE při napájecím napětí 12V



Obr. č 7.6 Charakteristiky elektromotoru AXI 4120/18 GOLD LINE při napájecím napětí 14 V



Obr. č 7.7 Porovnání průběhu výkonu na hřídeli pro napájecí napětí 8 [V] a 14 [V]



Obr. č 7.9 Porovnání průběhu účinnosti pro napájecí napětí 8 [V] a 14 [V]

Z naměřených hodnot a charakteristik je zřejmé, že s rostoucí hodnotou napájecího napětí roste i maximální hodnota dodávaného výkonu a otáček na hřídeli motoru. Účinnost tohoto motoru, ale i krouticí moment se při změně napětí mění jen nepatrně. Naměřené hodnoty se také téměř přesně shodují s hodnotami uváděnými výrobcem. Nepatrné odchylky naměřených hodnot s hodnotami uváděnými výrobcem těchto elektromotorů mohou vzniknout následkem postupu měření, protože měřený elektromotor byl napájen ze střídavého regulátoru, na kterém vznikají také určité ztráty. Mezi další ztráty také patří ztráty na spojení mezi motorem a dynamometrem, ztráty na samotném dynamometru, ale také nepřesnosti měření vzniklé nesprávným uchycením měřeného elektromotoru k příslušnému celému měřicímu zařízení.

8. Přehled průzkumu trhu podle uvedených kritérií

V této kapitole bude proveden průzkum trhu s modelářskými elektromotory a elektronikou. Jelikož je výrobců a dovozců špičkových elektromotorků ohromné množství, pokusím se zde vyjmenovat alespoň některé nejznámější výrobce a to jak zahraniční tak i domácí. Kompletní nabídku všech vyráběných elektromotorků od jednotlivých uvedených výrobců lze nalézt v literatuře: [15-22] a nabídky tří jsou úplně uvedeny v přílohách č. 1-3, které jsou uloženy na CD disku.

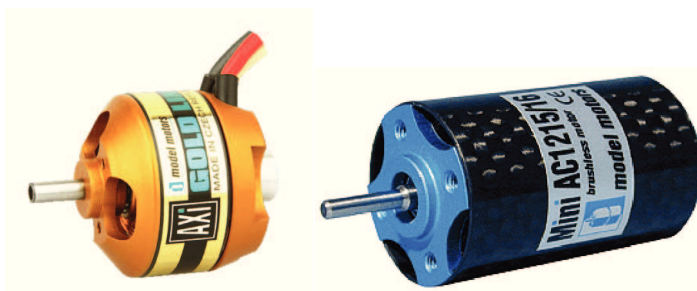
8.1 Domácí výrobci modelářských elektromotorků a elektroniky

V následujících odstavcích je uvedeno několik nejznámějších výrobců a distributorů modelářských elektromotorků a elektroniky.

Model Motors

Společnost MODEL MOTORS s.r.o. je již od roku 2001 výrobcem vysokovýkonných střídavých elektromotorků AXI. Elektromotory vyráběné firmou MODEL MOTORS patří díky své vysoké kvalitě zpracování, spolehlivosti a technickými parametry mezi to nejlepší ze současné nabídky na trhu. Tato firma patří také mezi jednu z prvních firem, která vyráběla střídavé modelářské elektromotory s rotačním pláštěm tedy motory typu „outrunner“.

Motory řady AXI s otočným pláštěm vynikají zejména vysokým kroučícím momentem, díky kterému je možné použít vrtule o velkém průměru (a vyšší účinnosti) bez převodů. Velkou předností je vysoká proudová zatížitelnost motorů AXI a díky tomu vynikající poměr výkon/hmotnost. Příklady elektromotorů vyráběných firmou MODEL MOTORS s.r.o. jsou zobrazeny na Obr. č. 8.1a přehled kompletní nabídky je uveden v katalogu v příloze č. 1.



Obr. č. 8.1 Příklady střídavých elektromotorů vyráběných firmou MODEL MOTORS s.r.o., motor AXI 2208/20 EVP GOLD LINE (s vnějším rotorem) a motor Mini AC 1215/16 (s vnitřním rotorem)

Mega motor

Tato firma se zabývá výrobou elektrických motorů nejrůznějších typů určených pro modely letadel, vrtulníků, aut a lodí. Kromě toho nabízí i řadu typů speciálních elektromotorů použitelných v nejrůznějších průmyslových aplikacích. K elektromotorům dále vyrábí i příslušenství v podobě převodovek a nabízí také i sortiment potřebných náhradních dílů.



Obr. č. 8.2 Příklady elektromotorků vyráběných firmou Mega motor, motor MEGA mini 7E a MIG 600 (komutátorové motorky) a motor MEGA ACn 22/30/ (střídavý s vnitřním rotorem)

MP JET

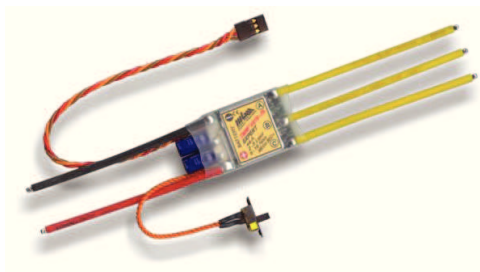
Tato firma je výrobcem elektromotorů MPJ , převodovek, konektorů, příslušenství táhel, pák, šroubů a dalšího širokého příslušenství k elektromotorům a modelům. MPJ motory jsou touto firmou vyráběny jako motory s rotačním pláštěm (s vnějším rotorem) ale i motory s vnitřním rotorem. Příklady vyráběných motorů jsou zobrazeny v následujících obrázcích a kompletní nabídka elektromotorů a příslušenství je zobrazena v katalogu v příloze č. 2.



Obr.č.8.3 Příklady střídavých elektromotorů vyráběných firmou MP JET s.r.o., motor MPJ 20199 (s vnějším rotorem), motor MiniAC 1215/16 (s vnitřním rotorem) a příklad provedení převodovky.

MGM compro

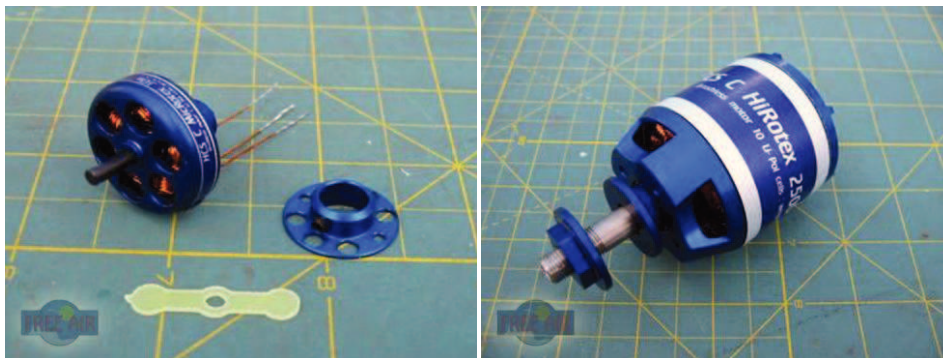
Společnost MGM compro se zabývá vývojem a výrobou špičkové modelářské elektroniky jako jsou střídavé regulátory a to i pro ty nejvyšší výkony, Li-Pol srovnávací nabíječe, Li-Pol balancery, speciální zařízení a mnoho dalšího. Produkty společnosti MGM compro vynikají svou kvalitou, technickým řešením, jedinečnými vlastnostmi a parametry. Společnost MGM compro je také distributorem Li-Pol baterií a Li-Pol bateriových paků světové značky KOKAM určených jako pohonné zdroje modelů.



Obr. č. 8.4 Příklad provedení regulátoru od firmy MGM compro určeného pro střídavé elektromotorky maximálním trvalým proudem 33A.

Free Air

Jedná se o výrobce elektromotorů vysoké kvality určených pro pohon modelů letadel a vrtulníků. Dále tato firma nabízí široký sortiment příslušenství k elektromotorům a je také dodavatelem CNC frézek. Příklady vyráběných motorů firmou Free Air jsou na následujících obrázcích.



Obr. č. 8.5 Příklad provedení střídavých elektromotorů s vnějším rotorem od firmy Free Air, motor HCS C 30W/10 určený pro malé halové modely a motor HCS C 2500W/10 používaný pro pohon velkých akrobatických modelů

8.2 Zahraniční výrobci modelářských elektromotorků a elektroniky

V následujících odstavcích je uvedeno několik nejznámějších výrobců a distributorů kvalitních a spolehlivých modelářských elektromotorků a elektroniky.

Scorpion Power System

Společnost Scorpion Power System se specializuje na výrobu vysoce výkonných a kvalitních elektromotorů a regulátorů. Motory od této firmy jsou vyráběny jako motory s rotačním pláštěm (s vnějším rotorem), ale i motory s vnitřním rotorem a jsou sestaveny z vysoce kvalitních dílů z hliníkových slitin. Následující obrázky zobrazují příklady vyráběných elektromotorů a regulátorů.



Obr. č. 8.6 Příklad provedení střídavých elektromotorů s vnějším rotorem a plně programovatelný regulátor od firmy Scorpion Power System.

Hacker Brushless Motors

Jedná se o výrobce špičkových pohonných elektromotorů určených pro modely všech kategorií. Jejich elektromotory jsou požívané pro pohon malých halových modelů ale i pro velké vysoce výkonné modely vrtulníků a velkých akrobatických modelů letadel. Dále se tato firma zabývá výrobou modelů z EPP (extrudovaný polypropylén) a distribucí nejrůznějšího modelářského příslušenství a pohonných akumulátorů. Kompletní nabídka motorů a příslušenství je uvedena v katalogu v příloze č. 3.



Obr. č. 8.7 Příklad provedení střídavých elektromotorů s vnějším a vnitřním rotorem a plně programovatelného regulátoru od firmy Hacker Brushless Motors

Dualsky - Shanghai Dualsky Modely

Tato společnost se specializuje na výrobu a prodej elektronických systémů, elektromotorů a napájecích baterií. Zákazníkům poskytuje kvalitní a cenově dostupné výrobky. Motory vyráběné touto firmou jsou v provedení jak s rotačním pláštěm (s vnějším rotorem) tak i motory s vnitřním rotorem.



Obr. č. 8.8 Příklad provedení střídavých elektromotorů s vnějším rotorem od firmy Dualsky.

Mezi další známější výrobce elektroniky a modelářských elektromotorů patří:

- JETI model- výrobce modelářské elektroniky a kvalitních regulátorů
- Graupner - výrobce elektroniky (RC soupravy, přijímače atd.) a elektromotorů
- Pienkovski - výrobce elektromotorů XTRM
- Hitec RC - výrobce elektroniky (RC soupravy, přijímače atd.) a příslušenství
- Multiplex - výrobce elektroniky (RC soupravy, přijímače atd.) a příslušenství
- Futaba - (RC - R/C) výrobce elektroniky (RC soupravy, přijímače atd.) a příslušenství

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nastudovat principy funkce a konstrukce modelářských stejnosměrných komutátorových a bezkartáčových elektromotorů. V teoretické části této bakalářské práce jsou tedy popsány základní principy funkce těchto elektromotorů, jejich vlastnosti a možnosti konstrukčního uspořádání. Dále jsou zde uvedeny také základní vlastnosti a principy regulátorů používaných pro regulaci těchto elektromotorů.

V další části této práce byl proveden popis měřicího pracoviště pro měření na elektromotorech malého a středního výkonu, které se nachází v jedné z laboratorů VŠB – TUO. Pomocí přístrojů v této laboratoři bylo následně provedeno měření na bezkartáčovém střídavém elektromotoru AXI 4120/18 GOLD LINE vyráběného firmou Modelmotors s.r.o.. Toto měření bylo prováděno za účelem srovnání hodnot udávaných výrobcem a hodnot naměřených v laboratoři, přičemž se naměřené hodnoty téměř přesně shodují s hodnotami uváděnými výrobcem.

V poslední části této bakalářské práce byl proveden průzkum trhu s modelářskými elektromotory a je zde uvedeno několik domácích ale i zahraničních výrobců a distributorů.

V této práci jsem se tedy seznámil s problematikou malých stejnosměrných komutátorových a bezkartáčových (elektricky komutovaných) motorů. Jako další pokračování této práce by mohl být proveden návrh a konstrukce bezkartáčového elektromotorku pro pohon modelu letadla.

Seznam použité literatury

- [1] ŘÍHA, J. *Elektrické stroje a přístroje*, SNTL 1986 Praha, 1986
- [2] BROŽ, J. *Elektřina a magnetismus II.*, SPN Praha, 1976
- [3] KOCMAN, S. *Stejnoseměrné stroje*, VŠB-TU Ostrava, 2002
- [4] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*, VUT Brno, 2007
- [5] MRAVEC, R. *Elektrické stroje a přístroje - I. Elektrické stroje*, SNTL Praha, 1982, druhé vydání
- [6] Halliday D., Resnick R., Walker J. *Fyzika, Elektřina a magnetismus*, John Wiley & Sons, 1997.
- [7] *Malé stejnosměrné motory*, [online], Dostupné z: http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf (březen 2012) [cit. 18-7-2002]
- [8] *Permanentní magnety*, [online], Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf (březen 2012)
- [9] *Řízení motorů s permanentními magnety bez snímačů otáček*, [online], Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/rizeni-motoru-s-permanentnimi-magnety-bez-snimacu-otacek/> (leden 2012)
- [10] BRANDŠTETTER, P. *Střídavé regulační pohony – Moderní způsoby řízení*, Ostrava, 1999
- [11] *HD and ED Series Hysteresis Dynamometers manual*, [online], Dostupné z: http://www.magtrol.com/motortest/hd_dynamometers.html (březen 2012)
- [12] *Hysteresis Brake and Clutches*, [online], Dostupné z: <http://magtrol.com> (březen 2012)
- [13] UHLÍŘ, I. *Elektrické stroje a pohony*, ČVUT Praha, 2007
- [14] <http://www.uzimex.cz/Ke-stazeni/Clanky.html> [online], (březen 2012)
- [15] Katalog MODEL MOTORS s.r.o., [online], Dostupný z: <http://www.modelmotors.cz/> (březen 2012)
- [16] Katalog Mega MOTORS s.r.o., [online], Dostupný z: <http://www.megamotor.cz> (březen 2012)
- [17] Katalog MP JET s.r.o. , [online], Dostupný z: <http://www.mpjet.com> (březen 2012)
- [18] Katalog MGM compro s.r.o. , [online], Dostupný z: <http://www.mgm-compro.cz> (březen 2012)
- [19] Katalog Free Air , [online], Dostupný z: <http://www.freeair.cz> (březen 2012)
- [20] Katalog Scorpion Power System , [online], Dostupný z: <http://www.scorpionsystem.com> (březen 2012)

- [21] Katalog Hacker Brushless Motors, [online], Dostupný z: <http://www.hacker-motor-shop.com/> (březen 2012)
- [22] Katalog Dualsky - Shanghai Dualsky Modely , [online], Dostupný z: <http://www.dualsky.com> (březen 2012)
- [22] YEADON, WILLIAM H, *Handbook Of Small Electric Motors*, McGraw-Hill London 2001
- [23] LANGER, T. *Měření na elektromotorcích malých výkonů*. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. 2010
- [24] *Řízení malých stejnosměrných motorů maxon*, [online], Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/vyhledavani.php?fact=all&fword=%F8%EDzen%ED+mal%FDch+&x=0&y=0> (leden 2012)
- [25] CHMELÍK, K., POSPIŠILÍK, J. *Elektrické stroje v energetice – Stejnosměrné stroje*, VŠB-TU Ostrava, 2003
- [26] HOŘAVA, J. *Modelování a simulace vektorového řízení EC motoru v prostředí Simulink*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [27] TOMÁŠEK, Z. *Konstrukce modelářského elektromotorku*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta – Katedra fyziky, 2007
- [28] BUBLÍK, S. *Výukový modul pro předmět mikropočítače: BLDC motor*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2010
- [29] BĚLOHOUBEK, P. *Elektrické servopohony, jejich řízení a aplikace I.*, ICB Brno, 1998
- [30] NEBORÁK, I. *Mechatronické systémy*, VŠB-TU Ostrava, 2009

Seznam příloh

Všechny přílohy jsou provedeny jako elektronické a jsou uloženy na přiloženém CD- ROM disku.

Obsah přiloženého CD-ROM disku

Na CD-ROM disku jsou obsaženy dvě složky. První složka „Bakalářská práce“, obsahuje vypracovanou bakalářskou práci v elektronické podobě, ve formátu Adobe Acrobat PDF.

Druhá složka obsahuje přílohy katalogových listů od vybraných výrobců:

- I Příloha č. 1 – Katalog MODEL MOTORS s.r.o
- II Příloha č. 2 – Katalog MP JET s.r.o
- III Příloha č. 3 – Katalog Hacker Brushless Motors